



Bachelorarbeit

Reinhold, Daniel

**Optimierung des Vergießprozesses von eingegrabenen Magneten in
Hybrid-Rotoren**

2012

Bachelorarbeit

Optimierung des Vergießprozesses von eingegrabenen Magneten in Hybrid-Rotoren

Autor: Daniel Reinhold

Studiengang: Maschinenbau

Fakultät: Maschinenbau

Seminargruppe: MB09w1-B

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Gebhardt

Zweitprüfer: Dr. Keir Foster

Mittweida, den 10. Dezember 2012

Bibliografische Angaben

Reinhold, Daniel:

Optimierung des Vergießprozesses von eingegrabenen Magneten in Hybrid-Rotoren

64 Seiten, 68 Abbildungen, 3 Anlagen,

Hochschule Mittweida (FH), Fakultät Maschinenbau

Bachelorarbeit, 2012

Referat

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit dem Hybridantrieb im Fahrzeug. Dabei wird ein Bauteil des Rotors im Elektromotor näher untersucht. Dieses wichtige Element innerhalb des Elektromotors bildet die Versuchsgrundlage. Es handelt sich um das Lamellenpaket mit vergrabenen Magneten, welches auf die Rotorwelle aufgedrückt ist. Um die hohe Qualität dieser Bauteile zu gewährleisten, werden die im Lamellenpaket verklebten Magnete stichprobenartig ausgepresst. Die Untersuchung der dabei auftretenden Auspresskräfte ist der Kern in den in dieser Bachelorarbeit aufgestellten und durchgeführten Versuchsplänen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	xi
Vorwort	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Ziel der Arbeit	2
1.3 Kapitelübersicht	2
1.4 Unternehmensstruktur	3
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Der Hybrid	6
2.2 Das Elektroblech	7
2.3 Das Lamellenpaket	10
2.4 Die Magnete	11
2.5 Der Verklebeprozess	14
2.6 Die statistische Versuchsplanung	18
2.7 Begriffe der Statistik	20

3	Versuchsplan	23
3.1	Bestehendes Problem	24
3.2	Beispiel über die Streuung der Auspresskräfte und die Unterschiedlichkeit der Kurvenverläufe	25
3.3	Vollständig faktorieller Versuchsplan 2^3	28
4	Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung	29
4.1	Analyse und Verbesserung der Auspressvorrichtung	30
4.2	Vorversuch	34
4.3	1. Versuchsreihe	36
4.3.1	1. Durchlauf	37
4.3.2	2. Durchlauf	41
4.3.3	Vergleich der Durchläufe 1 und 2	45
4.4	2. Versuchsreihe	47
4.4.1	1. Durchlauf	48
4.4.2	2. Durchlauf	52
4.4.3	Vergleich der Durchläufe 1 und 2	56
4.5	Zusatzversuche	58
5	Schlussfolgerung und Ausblick	61
5.1	Schlussfolgerung	62
5.2	Ausblick	63
A	DIN-Norm	65
A.1	DIN EN 10106 Elektroblech - Ausschnitt	65
B	Signifikanzprüfung Minitab	67
B.1	1. Versuchsplan 1. Durchlauf	67
B.2	1. Versuchsplan 2. Durchlauf	70
B.3	2. Versuchsplan 1. Durchlauf	73
B.4	2. Versuchsplan 2. Durchlauf	76

C Minitab-Arbeitsblätter	79
C.1 Vorversuch	79
C.2 1. Versuchsreihe 1. Durchlauf	82
C.3 1. Versuchsreihe 2. Durchlauf	86
C.4 2. Versuchsreihe 1. Durchlauf	90
C.5 2. Versuchsreihe 2. Durchlauf	94
 Literaturverzeichnis	 98
 Erklärung	 100

Abbildungsverzeichnis

1.1	Unternehmensstruktur	4
2.1	Elektrobandherstellung (Quelle: [3])	8
2.2	Gestanztes Elektroblech	9
2.3	Ansicht Lamellen	10
2.4	Lamellenpaket einer PSM mit Magnete und markierten Stanzpaketierungspunkten	10
2.5	Entmagnetisierungskurve RT	12
2.6	Entmagnetisierungskurve 180°C	13
2.7	Magnet für Lamellenpaket	13
2.8	Montagevorrangsgraph Musterbau	15
2.9	Montagevorrangsgraph Serienfertigung	15
2.10	Verklebeharz Voltatex 4250	16
2.11	Verwendetes Dosiermessgerät	16
2.12	Schema des LP auf einem WT (WT der Serienfertigung) - Quelle: [1]	17
2.13	Schematische Darstellung des Magneten im Lamellenpaket	17
2.14	Design of Experiments	18
2.15	Anzahl der Versuche „Vollfaktorieller Versuchsplan“	19
3.1	Übersicht Einflüsse Auspresskraft	24
3.2	Schema Aufpressen von LP auf eine Welle (Quelle: [1])	25
3.3	Übersicht Streuung	26
3.4	Kurven Auspressvorgang	27

3.5	Schematische Darstellung des Auspressvorganges (Quelle:[1])	27
3.6	Beispielübersicht - Dem Prozess positiv- und negativ-veränderte Parameter	28
4.1	Zuordnung von Einflussfaktoren auf Auspressversuche	30
4.2	Auspressvorrichtung - Ansicht von oben	30
4.3	Auspressvorrichtung - Ansicht von unten	31
4.4	Schema der Auspressvorrichtung mit eingezeichneten Änderungen . .	31
4.5	Auspresstempel	32
4.6	Auspressmaschine Z250 der Firma Zwick/Roell	33
4.7	Einflussfaktoren und Parameter im Vorversuch	34
4.8	Diagramm über die Auspresskraft im Vorversuch	34
4.9	Haupteffektdiagramm der Auspresskraft im Vorversuch	35
4.10	Einstellparameter 1. Versuchsreihe	36
4.11	Diagramm über die Auspresskraft der ersten Versuchsreihe - erster Durchlauf	37
4.12	Erster Versuchsplan Erste Versuchsreihe Wahrscheinlichkeitsnetz . . .	38
4.13	Erster Versuchsplan Erste Versuchsreihe Histogramm	38
4.14	Erster Versuchsplan Erste Versuchsreihe Pareto	39
4.15	Erster Versuchsplan Erste Versuchsreihe Wahrscheinlichkeitsnetz für Effekte	39
4.16	Erster Versuchsplan Erste Versuchsreihe Haupteffektdiagramm	40
4.17	Erster Versuchsplan Erste Versuchsreihe Boxplot	41
4.18	Diagramm über die Auspresskraft der ersten Versuchsreihe - zweiter Durchlauf	41
4.19	Erster Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Wahrscheinlichkeitsnetz . .	42
4.20	Erster Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Histogramm	42
4.21	Erster Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Pareto	43
4.22	Erster Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Wahrscheinlichkeitsnetz für Effekte	43

4.23	Erster Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Haupteffektdiagramm . . .	44
4.24	Erster Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Boxplot	44
4.25	Einstellparameter 2. Versuchsreihe	47
4.26	Diagramm über die Auspresskraft der zweiten Versuchsreihe - erster Durchlauf	48
4.27	Zweiter Versuchsplan Erste Versuchsreihe Wahrscheinlichkeitsnetz . .	49
4.28	Zweiter Versuchsplan Erste Versuchsreihe Histogramm	49
4.29	Zweiter Versuchsplan Erste Versuchsreihe Pareto	50
4.30	Zweiter Versuchsplan Erste Versuchsreihe Wahrscheinlichkeitsnetz für Effekte	50
4.31	Zweiter Versuchsplan Erste Versuchsreihe Haupteffektdiagramm . . .	51
4.32	Zweiter Versuchsplan Erste Versuchsreihe Boxplot	51
4.33	Diagramm über die Auspresskraft der zweiten Versuchreihe - zweiter Durchlauf	52
4.34	Zweiter Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Wahrscheinlichkeitsnetz .	53
4.35	Zweiter Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Histogramm	53
4.36	Zweiter Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Pareto	54
4.37	Zweiter Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Wahrscheinlichkeitsnetz für Effekte	54
4.38	Zweiter Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Haupteffektdiagramm . .	55
4.39	Zweiter Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Boxplot	55
4.40	Magnet mit Längskratzer	59
4.41	Magnet mit Querkratzer	59
4.42	Diagramm Auspresskraft Zusatzversuche	60
5.1	Mögliche Positionen des Magneten im LP	63
5.2	Magnet mit Restharz und Magnet mit Beschädigung	64
5.3	Nächster möglicher Versuchsplan	64
A.1	Ausschnitt aus DIN-Norm Elektrolech	65

Tabellenverzeichnis

4.1	Serienparameter	47
-----	---------------------------	----

Abkürzungsverzeichnis

DoE	Design of Experiments
FuP	Fertigungs- und Prüfanweisung
HiP	Hildesheim Plant
IMG	Integrated Motor Generator
LP	Lamellenpaket
Max	Maximum
Min	Minimum
MOE	Manufacturing Organisation and Engineering
MW	Mittelwert
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
Nfz	Nutzfahrzeug
OF	Oberfläche
PKW	Personenkraftwagen
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
RT	Raumtemperatur
Rz	gemittelte Rauhtiefe
SMG	Seperate Motor Generator
TEF	Technische Funktionen
WT	Werkstückträger

Vorwort

Die hier vorliegende Bachelorarbeit ist im Zeitraum zwischen September 2012 und Dezember 2012 in der Robert Bosch GmbH am Standort Hildesheim, Abteilung Technische Funktionen (HiP/TEF1.2) entstanden. Betreut wurde die Arbeit durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Gebhardt an der Hochschule Mittweida - University of Applied Sciences aus der Fakultät Maschinenbau sowie durch Herrn Dr. Keir Foster von der Robert Bosch GmbH in Hildesheim.

Besonderer Dank gilt vor allem Herrn Prof. Gebhardt für die umfangreiche Betreuung der Arbeit, Herrn Keir Foster für die fachliche und organisatorische Unterstützung sowie die Übernahme der Zweitkorrektur, Frau Gudrun Geithner für ihre Unterstützung und Bereitstellung aller notwendigen Arbeitsmittel im Chemielabor, Herrn Sören Hahne für seine fachliche Unterstützung im Magnetlabor, Herrn Sascha Scholz für seine tatkräftige organisatorische und fachliche Unterstützung sowie das Auspressen der Magnete, den Herren Armin Specht, Andreas Sander und Mirosław Abramowicz für ihre Beratung bei dem Verkleben von Lamellenpaketen sowie das Bereitstellen des Dosiermessgerätes, der Werkstückträger und des Verklebharzes, Frau Birgit Diedrich für fachliche und fachfremde Hinweise sowie Kay-Uwe Warmboldt, Uwe Rabe und meinem Bruder für viele motivierende Worte und ihre fachliche Meinung zu verschiedensten Bereichen.

Kapitel 1

Einleitung

Im einleitenden Kapitel werden die Motivation und die Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit besprochen. Gleichzeitig erfolgt ein kurzer Überblick zu den einzelnen Kapiteln dieser Arbeit, ebenso zum Unternehmen.

1.1 Motivation

In der heutigen Zeit gewinnen umweltfreundliche Fahrzeuge immer mehr an Bedeutung. Gerade in dieser Zeit, in der sich das Umweltbewusstsein immer stärker ausprägt, sind Fahrzeuge dieser Art nicht mehr wegzudenken. So ist ein Schritt für die Schonung unserer Umwelt die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung sogenannter Hybridfahrzeuge, die als Antrieb einen Verbrennungsmotor mit einem Elektromotor kombinieren und somit einen reduzierten Schadstoffausstoß aufweisen. Ein weiterer positiver Effekt dieser Technik ist die Senkung des Spritverbrauches und die damit verbundene Ressourcenschonung, denn die bestehenden Ölvorkommen werden durch eine wachsende Mobilität der Bevölkerung in absehbarer Zeit erschöpft sein. Dadurch ist es in Zukunft wichtig, immer weiter spritsparendere Fahrzeuge zu entwickeln und auf den Markt zu bringen, welche jedoch in Hinsicht auf Fahrkomfort keinerlei Einbuße mit sich bringen. Eine Optimierung der Komponenten, welche zu solch einem positiven Effekt führen, ist daher das fortwährende Bestreben. Damit ist der Rotor im Elektromotor, auf dessen Basis sich die Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit bezieht, eine Schlüsselkomponente, die direkt an dieser Optimierung beteiligt ist.

1.2 Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit befasst sich im Rahmen der Aufgabenstellung mit der Optimierung des Vergießprozesses von Magneten in Hybrid-Rotoren. Es sollen dabei die Streubreite der Auspresskräfte reduziert, Einflussfaktoren analysiert und ein Vorschlag für eine serienbegleitende Prüfvorschrift erstellt werden. Dazu werden die dafür benötigten theoretischen Grundlagen vorgestellt und beschrieben. Die aus den Ergebnissen gewonnenen Erkenntnisse sollen nach Möglichkeit als Folge in die Serienprozesse einfließen und den bestehenden Prozess verbessern.

1.3 Kapitelübersicht

Kapitel 1 In diesem Kapitel findet eine allgemeine Einleitung statt.

Kapitel 2 Beschäftigt sich mit einer kleinen, aber definierten Auswahl an Grundlagen. In diesem Kapitel soll ausschließlich eine Einführung in die jeweilige Thematik gegeben werden.

Kapitel 3 In diesem Kapitel wird der Versuchsplan dargestellt und beschrieben. Es wird desweiteren auf das bestehende Problem eingegangen und mittels des ersten erstellten Versuchsplanes der Lösungsansatz erläutert.

Kapitel 4 Dieses Kapitel beinhaltet die Darstellung und Erklärung der Versuchsdurchführung. Dabei werden die geplanten Versuchsreihen vorgestellt. Ebenfalls erfolgt die Auswertung dieser Versuche in diesem Kapitel.

Kapitel 5 Im 5. Kapitel erfolgt eine Schlussfolgerung der gewonnenen Ergebnisse. Ebenso wird hier ein Ausblick auf weitere mögliche Untersuchungen gegeben.

1.4 Unternehmensstruktur

¹ Die Robert Bosch GmbH, welche 1886 in Stuttgart als "Werkstätte für Feinmechanik und Elektrotechnik" gegründet wurde, unterteilt sich in 3 große Unternehmensbereiche. Diese Unternehmensbereiche sind die Kraftfahrzeugtechnik, die Gebrauchsgüter und Gebäudetechnik und die Industrietechnik. Jeder dieser Bereiche unterteilt sich in eine Vielzahl von Geschäftsbereichen, so gehören beispielsweise die Bereiche "Diesel-Systems", "Gasoline-Systems", „Car Multimedia“ und „Starter Motors and Generators (SG)“ dem Unternehmensbereich Kraftfahrzeugtechnik an. Am Bosch Standort Hildesheim, an welchen im Rahmen des Studiums die Bachelorarbeit bearbeitet und verfasst worden ist, bildet der Bereich „Starter Motors and Generators“ den Hauptbereich. Desweiteren erfolgt eine Unterteilung dieser Geschäftsbereiche in Gruppen. So beinhaltet beispielsweise SG die Abteilungen "BPS-Bosch Production System", „QMM-Qualitätsmanagement“ und „TEF-Technische Funktionen“. In der Gruppe der TEF1, welche zusammen mit der TEF2 die TEF bildet, erfolgte die Durchführung des Bachelorprojektes. Die TEF1 ist für die Prozessentwicklung E-Maschine zuständig, das heißt, die 4 Kernkompetenzfelder dieser Abteilung, welche sind die Füge- und Verbindungstechnik, die Wickeltechnik, die Werkstofftechnik und die Prozessentwicklung, verbessern bzw. entwickeln in enger Zusammenarbeit neue E-Maschinen. In das Aufgabengebiet der TEF2 fällt die Industrialisierung E-Maschine. In dieser werden neue Fertigungslinien projektiert. Produkte, welche von SG entwickelt und hergestellt werden, sind so Generatoren und Starter für den Bereich PKW und Nfz ebenso wie Start/Stop-Systeme. Das Werk Hildesheim bildet dabei ein Leitwerk für Starter und Generatoren.

¹Quelle: [1]

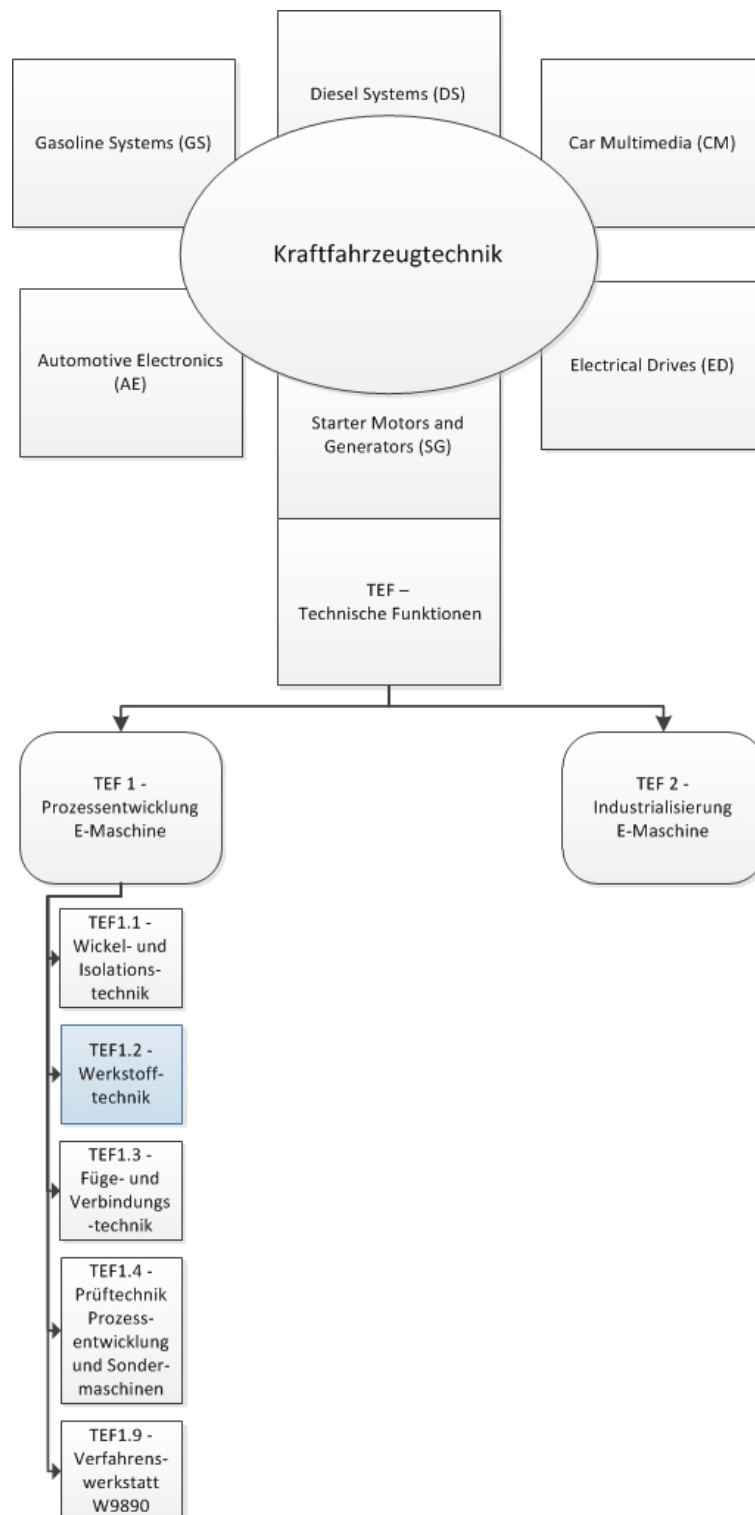


Abbildung 1.1: Unternehmensstruktur

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit einigen wichtigen Grundlagen, die zum Verständnis der bestehenden Problematik beitragen und helfen sollen, diese besser zu verstehen. Hierbei werden alle Grundlagen, beginnend vom Aufbau eines Lamellenpaketes, bis hin zur Erklärung der statistischen Versuchsplanung, welche als Versuchsgrundlage dient, behandelt.

2.1 Der Hybrid

Der Hybridantrieb, eine Kombination von Verbrennungsmotor und Elektromotor, ist geschichtlich betrachtet keine neue Entwicklung, denn zu Beginn des 20. Jahrhunderts waren vor allem Elektrofahrzeuge in den USA ein beliebtes Fortbewegungsmittel - Verbrennungsmotoren waren noch unausgereift, unzuverlässig und mussten von Hand gestartet werden. Die hohe Lärm- und Abgasbelastung war ebenfalls ein Punkt, in welchem Elektrofahrzeuge dem der Verbrennungsmotoren überlegen waren. Es kamen schon damals Gedanken auf, die Vorteile von Elektromotoren mit den Vorteilen von Verbrennungsmotoren zu kombinieren. So wurde bereits im Jahr 1900 auf der Weltausstellung in Paris ein von Ferdinand Porsche entwickeltes Fahrzeug gezeigt, bei welchem ein Generator an einen Benzinmotor gekoppelt war und 4 als Radnabenmotoren in den Rädern installierte Elektromaschinen mit Strom versorgte. Dies kann somit als erstes Hybridfahrzeug und auch als erstes Fahrzeug mit Allradantrieb angesehen werden.¹ Die Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren, mit ihren offensichtlichen Vorteilen, verdrängte jedoch zunächst den Elektromotor auch in seiner Kombination mit Verbrennungsmotoren, sodass erst in heutiger Zeit, in der Umweltbewusstsein und Ressourcenschonung an Bedeutung gewinnt, den Gedanken an ein solches Antriebskonzept wieder auferstehen lässt.

Heutige Hybridfahrzeuge besitzen einen Elektromotor, welcher auf einer Permanentterregten Synchronmaschine (PSM) basiert. Bei dieser Bauart wird das Läuferfeld durch Dauermagnete aufgebaut. Dadurch ist keine zusätzliche Energie für das Magnetfeld im Läufer notwendig. Im Gegensatz dazu wird bei fremderregten Synchronmaschinen der mit Wicklung versehene Rotor von Gleichstrom durchflossen und damit magnetisiert (Elektromagnet ersetzt Permanentmagnet).²

Die bei Bosch hergestellten E-Maschinen basieren auf der Funktionsweise einer PSM mit vergrabenen Magneten (eine Anbringung der Magnete an einer Rotoroberfläche ist ebenfalls möglich). Es werden dabei 2 Bauformen unterschieden. Das ist zum einen die SMG-Bauweise, zum anderen die IMG-Bauweise. SMG bedeutet „Separate Motor Generator“, diese E-Maschine ist separat im Fahrzeug verbaut. IMG ist die Abkürzung von „Integrated Motor Generator“. E-Maschinen von diesem Typ sind zwischen Motor und Getriebe verbaut. Die in dieser Bachelorarbeit betrachteten Bauteile sind dabei Teile für die SMG-Bauform. Eine Analyse der IMG-Bauweise wird im Rahmen der Bachelorarbeit nicht durchgeführt.

¹Quelle: [10]

²Quelle: [11]

2.2 Das Elektroblech

³ Elektroblech ist ein Stahlwerkstoff, welcher meist mit einer isolierenden Oberflächenbeschichtung versehen ist und in Magnetkernen eingesetzt wird. Diese Magnetkerne werden in elektrischen Systemen verwendet, zum Beispiel in Maschinen und Geräten für die Energieerzeugung (z.Bsp. Windkraftgeneratoren, Wasserkraftgeneratoren, Dieselgeneratoren), in der Energieübertragung und -verteilung in Transformatoren oder in Motoren (z.Bsp. Motoren für Haushaltsgeräte, Pumpen, Normmotoren).

Elektroblech gehört zu den weichmagnetischen Werkstoffen, das heißt, es ist besonders einfach magnetisier- und entmagnetisierbar. Die magnetischen Eigenschaften werden hauptsächlich durch den Siliziumgehalt, den Gehalt an Aluminium, geringer Mengen von Legierungselementen wie Mangan, Schwefel oder Stickstoff sowie durch Warmwalz-, Kaltwalz- und Glühprozesse bestimmt. Das in Anwendung befindliche Elektroblech ist nichtkornorientiert (isotrop), das bedeutet, dass die physikalischen Eigenschaften nicht richtungsabhängig sind, sondern in alle Richtungen gleichwertig. Ein vollständig isotropes Elektroblech herzustellen ist jedoch bisher aufgrund der Ver- bzw. Bearbeitung nicht gelungen, denn Warmumformung, Kaltumformung und Schlussglühen beeinflussen die Ausrichtung des Gefüges wesentlich.

Bei der Herstellung von Elektroblech gibt es mehrere Schritte:

- Stahlerzeugung
- Warmbänderzeugung
- Kaltbänderzeugung
- Wärmebehandlung
- Bandbeschichtung
- Zurichtung

Die Einstellung der Schmelze (Si/Al-Gehalt, Legierungselemente) erfolgt im Stahlwerk. Durch einen hohen Siliziumgehalt wird der spezifische elektrische Widerstand des Elektrobleches erhöht und dadurch die Ummagnetisierungsverluste reduziert, jedoch sinkt bei steigendem Si-Gehalt die Kaltumformbarkeit, weswegen in aller Regel dieser Anteil 3,2 % nicht überschreitet.

³Quelle: [2]

Nachdem die Schmelze eingestellt ist, kann wie folgt verfahren werden. Es stehen dabei 2 Möglichkeiten der Weiterverarbeitung zur Auswahl, unabhängig ob das Ziel eines schlussgeglühten oder nicht-schlussgeglühten Elektrobandes verfolgt wird.:

Nichtkornorientiertes Elektroband			
schlussgeglüht		nicht schlussgeglüht	
Stahlschmelze	Stahlschmelze	Stahlschmelze	Stahlschmelze
Dünnbrammengießen (50mm)	Stranggießen (215mm)	Dünnbrammengießen (50mm)	Stranggießen (215mm)
Ausgleichsofen	Brammendurchwärmung	Ausgleichsofen	Brammendurchwärmung
	Warmwalz-Vorstraße		Warmwalz-Vorstraße
Warmwalz-Fertigstraße	Warmwalz-Fertigstraße	Warmwalz-Fertigstraße	Warmwalz-Fertigstraße
Beizen + Besäumen	Beizen + Besäumen	Beizen + Besäumen	Beizen + Besäumen
Warmbandglühung	Warmbandglühung	Warmbandglühung	Warmbandglühung
Kaltwalzen	Kaltwalzen	Kaltwalzen	Kaltwalzen
Schlussglühung	Schlussglühung	Rekristallisationsglühung	Rekristallisationsglühung
Isolationsauftrag	Isolationsauftrag	Nachverformung und/oder Iso.auftrag	Nachverformung und/oder Iso.auftrag
Zurichten in Adjustageanlage	Zurichten in Adjustageanlage	Zurichten in Adjustageanlage	Zurichten in Adjustageanlage

Abbildung 2.1: Elektrobandherstellung (Quelle: [3])

Die Herstellung von Blechlamellen, welche bei Magnetkernen verwendet werden, wird durch Stanzen oder Schneiden realisiert. Technologien hierbei können Laserstrahlschneiden, Wasserstrahlschneiden, Folgeschnitt oder Komplettschnitt sein. Beim Stanzen kommt es zu einer Stanzgratbildung, die mit zunehmendem Verschleiß wächst. Infolge dessen wird die Stapeleigenschaft des Blechpakets (Lamellenpakets) verschlechtert. Diese Stapeleigenschaft wird mit Hilfe des Stapelfaktors beschrieben und bildet somit eine wichtige Eigenschaft von Elektrolechen. Desweiteren wirkt sich der Stanzgrat negativ auf den Verklebeprozess aus. So kann es passieren, dass in den Taschen befülltes Harz durch eine von den Stanzgrat verursachten Spalt nach außen dringt. Die Bleche der Lamellenpakete werden in der Regel durch Nieten oder Klammern fixiert. Schweißen oder Kleben ist als Alternative jedoch auch möglich.

Folgeschnitt als Verfahren des Stanzens:

Diese Art der Bearbeitung eignet sich vor allem bei Bandmaterial. Der Werkstoff wird auf eine Ablaufhaspel, welche sich vor der Stanze befindet, gespannt und durch eine Vorschubeinrichtung taktförmig in das Werkzeug geführt. Die bei jedem Takt entstandenen Stanzteile fallen durch die Werkzeugmatrize und werden mit Hilfe einer Auffangvorrichtung aufgereiht. Eine gitterlose Verarbeitung ist möglich und es lässt sich somit postulieren, dass es sich bei dieser Technologie um ein besonders materialsparendes Verfahren handelt, da die Kante des fertigen Teiles die Kante des Blechbandes ist.

Komplettschnitt als Verfahren des Stanzens:

Der Komplettschnitt wird meist für große Stanzteile und komplizierte Schnittgeo-

metrien verwendet. Wegen ihrer Größe werden fertige Stanzteile meist von Hand gestapelt.

Laserstrahlschneiden:

Bei diesem Verfahren wird zum Schneiden der Blechteile die Energie des Laserstrahles genutzt. Aufgrund der möglichen negativen Wirkung der Wärmeeinflusszone auf die magnetischen Eigenschaften sind an die Qualität des Verfahrens und der dazugehörigen technischen Einrichtung höchste Ansprüche zu stellen, weswegen dieses Verfahren hauptsächlich für die Herstellung von Prototypen und Kleinserien genutzt wird.

Wasserstrahlschneiden:

Hierbei wird zum Trennen die Schneidfähigkeit des unter Druck stehenden Wassers verwendet. Es handelt sich dabei um die Methode, die die magnetischen Eigenschaften am wenigsten beeinflusst. Da die Prozessgeschwindigkeit noch relativ gering ist, wird das Wasserstrahlschneiden meist nur für die Prototypenherstellung benutzt.

Das bei Bosch in Anwendung befindliche Elektrolech ist ein durch Folgeschnitt hergestelltes und nach DIN genormtes Blech mit der Bezeichnung M330-35A. Dieser Kurzname beinhaltet 2 Eigenschaften des Bleches, dass ist zum einen eine Dicke von 0,35mm sowie ein Ummagnetisierungsverlust von maximal 3,30 W/kg bei 50Hz und 1,5T.⁴

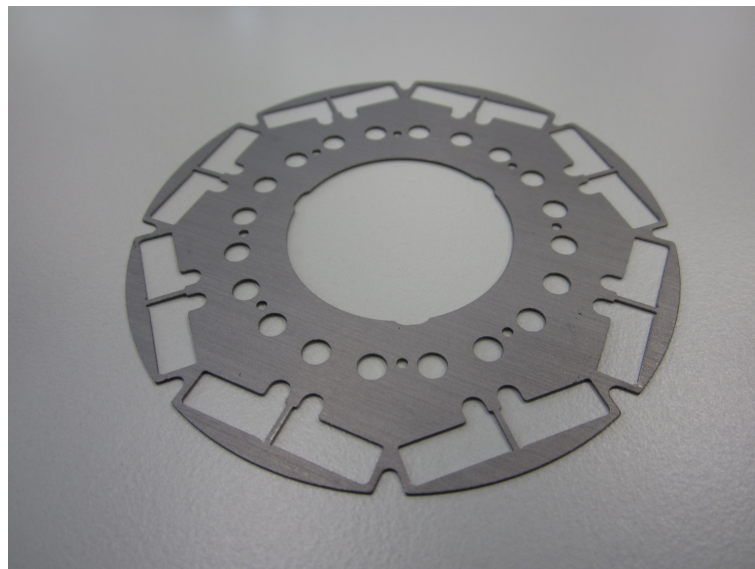


Abbildung 2.2: Gestanztes Elektrolech

⁴Vgl. Anhang A1

2.3 Das Lamellenpaket

Das Lamellenpaket (LP) ist eine Stapelung von Elektroblechen, welche durch Nieten, Klammern, Schweißen, Kleben oder auch Stanzpaketieren miteinander verbunden sind. Zur Isolation der einzelnen Bleche untereinander ist zunächst eine Phosphatierungsschicht auf diese aufgebracht worden. In dem von mir betrachteten LP sind 60 Elektrobleche zu einem solchen Blechpaket zusammengefasst. Als Paket werden diese, nachdem ihre Taschen mit Magneten bestückt und verklebt wurden, auf eine Welle aufgedrückt. Zusammen bilden sie den Rotor im Elektromotor.

Mithilfe des Verfahrens des Stanzpaketierens sind die bei Bosch verwendeten LP hergestellt worden. Durch mehrere kleine, durch Umformung hergestellte Geometrien innerhalb eines Bleches, ist so der Zusammenhalt von mehreren Blechen zu einem Ganzen umgesetzt.



Abbildung 2.3: Ansicht Lamellen

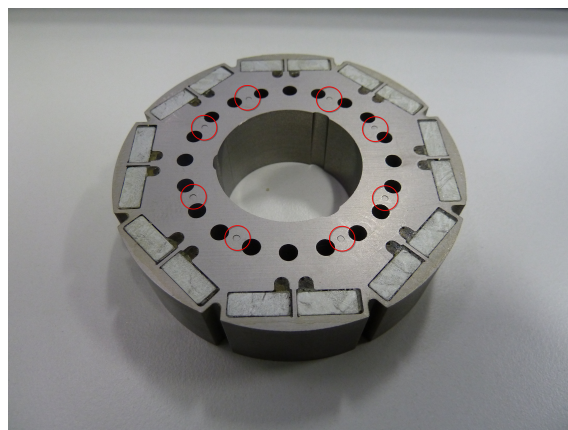


Abbildung 2.4: Lamellenpaket einer PSM mit Magnete und markierten Stanzpaketierungspunkten

2.4 Die Magnete

Die verwendeten Magnete bestehen aus einer Legierung der Elemente Neodym, Eisen und Bor ($Nd_2Fe_{14}B$). Diese gilt bisher als Werkstoff für die stärksten Dauermagnete. Ihre Stärke ist beträchtlich, denn sie können das 1300-fache ihres Eigengewichtes tragen⁵. Eingesetzt werden sie vor allem an Plätzen, an denen man starke Magnetfelder bei einem kleinen Volumen benötigt. Preislich liegen sie deutlich über dem Niveau der schwächeren Ferritmagnete.

Kenngrößen die einen Magneten beschreiben, sind u.a.⁶:

- Koerzitivfeldstärke H_C :
 - Gegenfeldstärke, die man benötigt um einen Magneten vollständig zu entmagnetisieren (Schnittpunkt Hysteresekurve⁷ mit der Feldstärke H (x-Achse))
 - * je größer H_C , desto größer der Widerstand gegen Entmagnetisierung
 - * H_{CB} mit Bezug auf magn. Flussdichte
 - nach Entfernen von H_{CB} Magnet immer noch magnetisch
 - * H_{CJ} mit Bezug auf magn. Polarisation
- Remanenz B_r :
 - Magnetisierung, die ein Bauteil nach Entfernen des äußeren Feldes behält (Schnittpunkt Hysteresekurve mit Flussdichte B (y-Achse))
- Energieprodukt BH :
 - ist die gesamte im Magneten gespeicherte Feldenergie

Reine NdFeB-Magnete entmagnetisieren schon ab 80°C teilweise. Um diesem Vorgang entgegenzuwirken, legiert man weitere Bestandteile hinzu, die diese Temperatur erhöhen (durch Dysprosium oder Terbium können Temperaturen über 200°C erreicht werden - allerdings sind diese Stoffe jedoch sehr teuer und erhöhen den Preis der

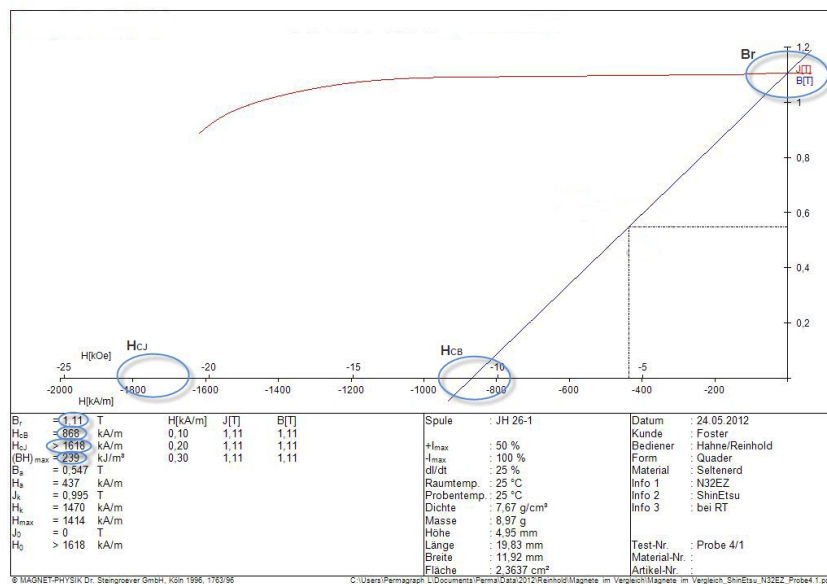
⁵Quelle: [3]

⁶Quelle: [4]

⁷Hysteresekurve: Zeigt Magnetisierungs- und Entmagnetisierungszyklus.

Magnete signifikant). Eine weitere negative Eigenschaft ist die hohe Korrosionsempfindlichkeit. Aus diesem Grund wird eine Beschichtung auf die Magnete aufgebracht. Häufig werden hierfür Nickel- oder Epoxidharzbeschichtungen verwendet.⁸

Die bei Bosch in Anwendung befindlichen Neodym-Eisen-Bor-Magnete der Firma „Shin Etsu“ verfügen über eine anorganische Beschichtung. Der chemische Name dieser Schutzschicht lautet Zinkphosphat-Dihydrat ($Zn_3(PO_4)_2 \cdot 2H_2O$) und besitzt eine Dicke von $5\text{--}25\mu\text{m}$. Die Oberflächenrauheit der Magnete ist mit einer gemittelten Rauhtiefe R_z von ca. $6\mu\text{m}$ gekennzeichnet.

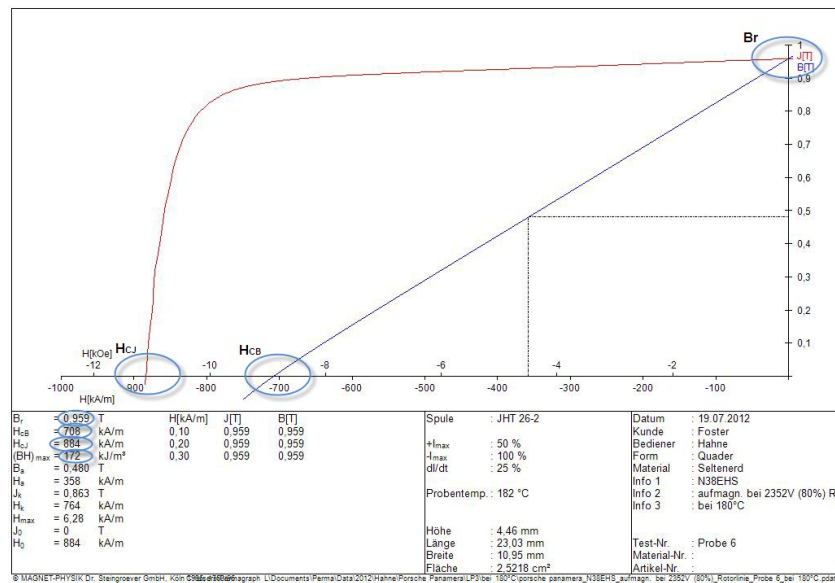


Abbildungung 2.5: Entmagnetisierungskurve RT

Ausschnitt aus Hysteresekurve - Entmagnetisierungskurve Beispiel:

- erkennbar sind H_{CB} und B_r
- H_{CJ} ist nicht erkennbar, da der verwendete Permagraph nicht ausreichend Leistung besitzt um den Magneten bei Raumtemperatur (RT) vollständig zu entmagnetisieren

⁸Quelle: [5]



Abbildungung 2.6: Entmagnetisierungskurve 180°C

Ausschnitt aus Hysteresekurve - Entmagnetisierungskurve Beispiel:

- erkennbar sind H_{CB} , H_{CJ} und B_r
- H_{CJ} ist bei dieser Kurve erkennbar, da Magnete bei höheren Temperaturen leichter entmagnetisieren und die Leistung des verwendeten Permagraphen für eine vollständige Entmagnetisierung dabei ausreichend ist.



Abbildungung 2.7: Magnet für Lamellenpaket

2.5 Der Verklebeprozess

Das Verbinden zweier Werkstücke durch Kleben ist seit langer Zeit üblich und lässt sich in das Fachgebiet der „Fügetechnik“ einordnen. Es wird mit Hilfe eines Klebstofffilmes die Verbindung zwischen den zu verbindenden Teilen erzielt. Dabei wird die Bindung durch Adhäsion und Kohäsion des erhärtenden Klebstoffes erreicht. Die Aushärtung des Klebstoffes kann durch eine Polykondensation⁹, Polymerisation¹⁰ oder Polyaddition¹¹ erfolgen und ist irreversibel. Dabei beträgt die Spanne der Aushärtezeit wenige Minuten bis 1 Woche.¹² Unterscheiden kann man zwischen:

- Kaltklebstoffe - *Aushärtung bei RT*
- Warmklebstoffe - *Aushärtung bei 100 - 200° C*
- Einkomponentenklebstoffe
- 2-Komponentenklebstoffe
- keramische Klebstoffe
- Metallklebstoffe

Bei dem in Anwendung befindlichen Kleber handelt es sich um Voltatex 4250, welches ein Einkomponenten Tränkharz ist und dessen Basis ein ungesättigtes Polyesterimidharz beinhaltet. Als eine Eigenschaft des Harzes lässt sich die hohe Zähigkeit nennen, Werte hierfür sind Viskositäten zwischen 2000 und 2500 mPa · s.¹³ Aushärten lässt es sich klassisch im Ofen oder durch eine UV-Bestrahlung. Im Musterbau sowie in der Serienfertigung wird die Aushärtung im Ofen¹⁴ angewandt, da sich aufgrund der Dicke des LP so auch die Aushärtung im Inneren sicherstellen lässt (UV-Bestrahlung führt lediglich zu einer oberflächlicher Aushärtung).

Nachdem das Lamellenpaket mit Magneten bestückt worden ist, werden diese darin verklebt. Dazu wird das LP mit dem äußeren Stanzgrat nach unten auf dem Werkstückträger (WT) aufgespannt. Nachdem dieser Vorgang abgeschlossen ist, werden die Magnete in die Taschen eingesetzt und zum Vorwärmen in den Ofen gelegt. Als einziger Unterschied zur Serienfertigung ist hierbei die verwendete Technologie

⁹Polykondensation = Kondensationsreaktion in Stufen, Polymerbildung aus Monomeren.

¹⁰Polymerisation = Polymerkettenbildung aus Monomeren, ohne erkennbare Reaktionsstufen.

¹¹Polyaddition = Reaktion wie Polykondensation, nur ohne Abspaltung von Nebenprodukten.

¹²Quelle: [12]

¹³Quelle: [15]

¹⁴Ofen der Serienfertigung = Durchlaufofen

zu nennen, bei dem das LP auf dem WT mittels Induktion vorgewärmt wird. Sobald der Vorwärmvorgang beendet ist wird der Klebstoff schnellstmöglich eindosiert. Eine schnelle Eindosierung ist hierbei notwendig, um eine zu große Abkühlung des LP zu verhindern. Bei diesem Vorgang wird das Harz in den Zwischenraum der noch zwischen Magnet und Tasche vorherrscht, eingefüllt. Im Anschluss wird das befüllte LP erhitzt und so die Klebermasse ausgehärtet.

Der Vorwärmvorgang ist hierbei von großer Bedeutung um eine niedrige Viskosität des Harzes einzustellen und damit eine hohe Fließfähigkeit zu erzeugen. Eine hohe Kapillarwirkung ist die Folge und damit eine gute Verteilung der Masse im Spalt zwischen Magnet und Tasche. Die bereits erwähnte Aufspannung des LP auf einen WT verfolgt ebenfalls ein wichtiges Ziel. Durch den durch eine Deckplatte bzw. Zentrierplatte hervorgerufenen Druck werden die einzelnen Lamellen zusammengepresst, sodass ein nach außen dringen des Harzes nach erfolgtem Befüllen durch einzelne Elektrobleche verhindert wird. Um auch eine Abdichtung zum WT zu erzeugen, befindet sich zwischen LP und WT eine Teflon-Silikonscheibe, welche zum einen diesen Abdichteffekt erzeugen und zum anderen ein Festhaften des LP auf dem WT verhindern soll.

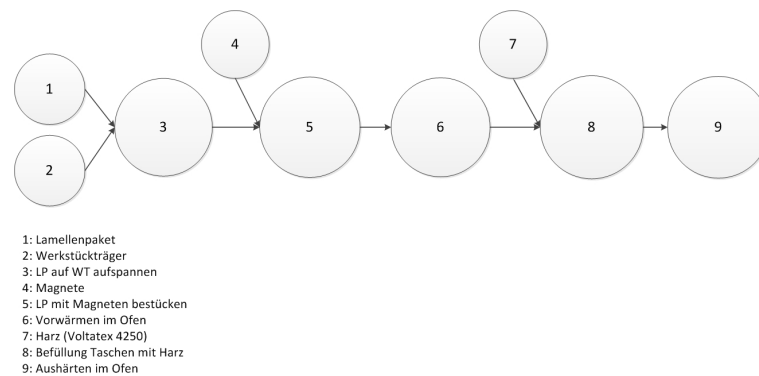


Abbildung 2.8: Montagevorrangsgraph Musterbau

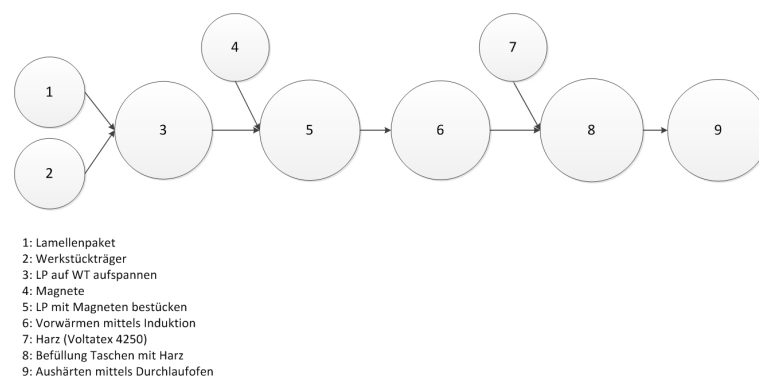


Abbildung 2.9: Montagevorrangsgraph Serienfertigung



Abbildung 2.10: Verklebharz Voltatex 4250



Abbildung 2.11: Verwendetes Dosiermessgerät

Das Befüllen der Magnettaschen erfolgte mit dem in Abb. 2.11 dargestellten Dosiermessgerät. Der verwendete Druck lässt sich ebenso wie die Hubmenge des in die Spritze eingefüllten Harzes einstellen. Dabei ist unter Hubmenge die Menge an Harz gemeint, die per Zeitsteuerung bei einmal Auslösen aus der Spritze fließt. Realisiert wird dieses Auslösen durch Betätigung eines Fußpedales. Es lässt sich somit die Harzmenge, welche in eine Tasche eingefüllt werden soll, regulieren.

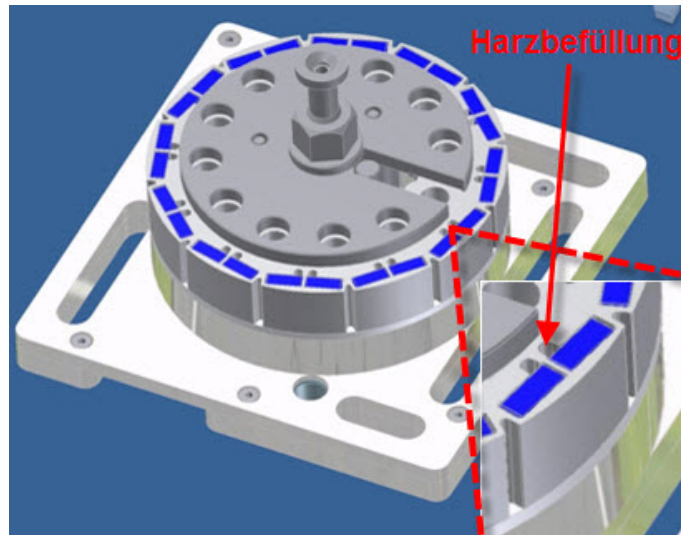


Abbildung 2.12: Schema des LP auf einem WT (WT der Serienfertigung) - Quelle: [1]

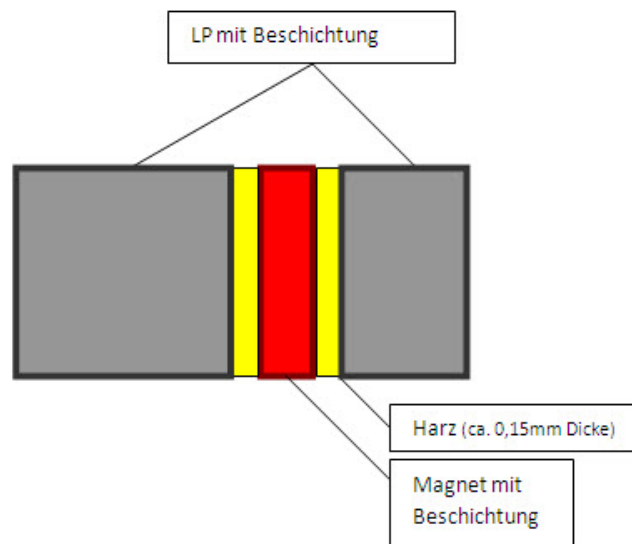


Abbildung 2.13: Schematische Darstellung des Magneten im Lamellenpaket

2.6 Die statistische Versuchsplanung

Das "Design of Experiments" (DoE) ist eine Methode zur statistischen Auswertung von Versuchen. Ziel ist es dabei durch eine geringe Anzahl an Versuchen möglichst viel über die Zusammenhänge von Einflussgrößen und Ergebnissen zu erfahren. Dabei soll die statistische Versuchsplanung Antworten auf folgende Fragen geben¹⁵:

- Welche Eingangsgrößen haben den größten Einfluss auf die Ausgangsgrößen?
- Welche Kombination von Werten der Eingangsgrößen beeinflusst die Zielgröße am günstigsten?
- Wie hoch ist die Empfindlichkeit der Ausgangsgröße auf Veränderung der Werte der Eingangsgrößen?

Bei der statistischen Versuchsplanung werden gleichzeitig mehrere Einflussgrößen verändert. Hauptwirkungen und Wechselwirkungen lassen sich so erkennen.¹⁶ Eine Einsparung an Zeit und Kapazität sowie eine eindeutige Interpretation der Versuchsergebnisse ist als Folge dessen Erkenntnisgewinnes möglich.

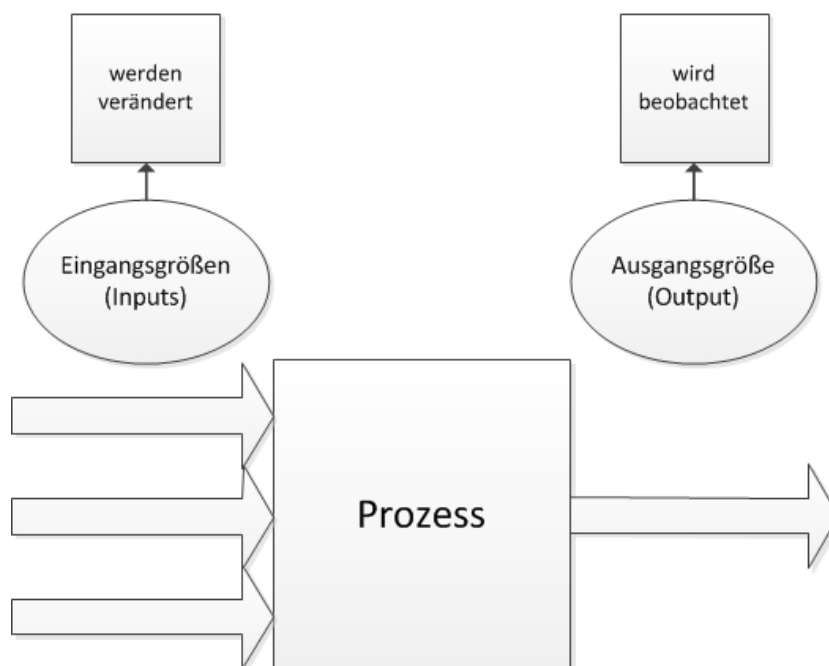


Abbildung 2.14: Design of Experiments

¹⁵Quelle: [6]

¹⁶Quelle: [9]

Weitere Vorteile, die das DoE auszeichnen, sind¹⁷:

- Versuchsaufwand ist planbar
- Versuchsaussagen sind statistisch abgesichert
- Zusammenhänge von Eingangsgrößen lassen sich systematisch untersuchen

Als ein klassischer Plan in der Versuchsplanung zählt der "Vollfaktorielle Versuchsplan". Bei diesem Versuchsplan werden alle möglichen Kombinationen von für den Versuch ausgewählten k Eingangsgrößen mit n Werten je Eingangsgröße gegeneinander getestet - alle möglichen Faktorkombinationen werden so durchgespielt.¹⁸

n^k = Anzahl der Testläufe

k... Faktoren

n... Werte

Anzahl Werte	Faktoren		
	2	3	4
2	4	8	16
3	9	27	81

Abbildung 2.15: Anzahl der Versuche „Vollfaktorieller Versuchsplan“

Es wurde in dieser Bachelorarbeit ein 2^3 Versuchsplan gewählt. Dabei ergibt sich folgender Modellansatz:¹⁹

$$y = f(x_1, x_2, x_3)$$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$$

x ... Einflussgröße

y ... Zielgröße

b_i ... Hauptwirkung, besitzt die Maßeinheit der Zielgröße

b_{ip} ... zweifaktorielle Wechselwirkung

$b_{12...k}$... k-faktorielle Wechselwirkung

¹⁷Quelle: [7]

¹⁸Quelle: [8]

¹⁹Quelle: [9]

2.7 Begriffe der Statistik

Es ist zunächst erforderlich Begrifflichkeiten zu erläutern, die für das Verständnis der statistischen Auswertung von Bedeutung sind.

Dabei sind folgende Definitionen essenziell:

Definition Histogramm:

Das **Histogramm** ist ein Balkendiagramm zur Erkennung und Darstellung der Verteilung von erfassten Einzelwerten.^a

^aQuelle: [14]

Definition Summenlinie im Wahrscheinlichkeitsnetz:

Ergeben die Summen der relativen Häufigkeiten im Wahrscheinlichkeitsnetz angenähert eine Gerade, so kann auf eine Normalverteilung der Einzelwerte geschlossen werden.^a

^aQuelle: [14]

Definition Gauß'sche Normalverteilung:

Kontinuierliche Merkmalswerte weisen in ihrer Verteilung häufig eine Charakteristik auf, die sich mit dem Modell der **Gauß'schen Normalverteilung** näherungsweise mathematisch beschreiben lässt.

Für unendlich viele Einzelwerte ergibt die Wahrscheinlichkeitsdichte einer Normalverteilung die typische Glockenkurve.

Diese symmetrische und stetige Verteilungskurve wird durch folgende Parameter eindeutig beschrieben:

Der **Mittelwert** μ liegt beim Kurvenmaximum und kennzeichnet die Lage der Verteilung.

Die **Standardabweichung** σ kennzeichnet die Streuung, d.h. das Abweichverhalten vom Mittelwert.^a

^aQuelle: [14]

Definition Boxplot-Grafik:

Eine grafische Zusammenfassung der Verteilung einer Stichprobe, die deren Form, Zentraltendenz und Streuung angibt, nennt man **Boxplot-Grafik**.

Sie dient zum leichteren Verständnis der Verteilung.^a

Die Elemente einer **Boxplot-Grafik** sind Ausreißer, Whisker und eine Box für den Interquartilsbereich.^b

^aQuelle: [16]

^bEine weitere Erklärung zu diesen Elementen ist in Abschnitt 5.1.1 gegeben

Definition Pareto-Diagramm:

Mit einem **Pareto-Diagramm** können die relativen Größen und die statistische Signifikanz von Haupt- und Wechselwirkungseffekten verglichen werden.

Die Effekte werden dabei in absteigender Reihenfolge dargestellt.

Eine Referenzlinie im Diagramm zeigt, welche Effekte signifikant sind.^a

^aQuelle: [17]

Definition Hauptwirkung:

Als **Hauptwirkung** bezeichnet man die Wirkung eines Faktors auf die Zielgröße.

Definition Wechselwirkung:

Eine **Wechselwirkung** liegt vor, wenn der Effekt eines Faktors von der Stufe eines anderen Faktors abhängt.^a

^aQuelle: [16]

Definition Wahrscheinlichkeitsnetz für Effekte:

Mit dem **Wahrscheinlichkeitsnetz für Effekte** können die relative Größe und die statistische Signifikanz von Haupt- und Wechselwirkungseffekten verglichen werden. Eine eingezeichnete Linie gibt an, wo die Punkte erwartet würden, falls keine Effekte austräten.

Punkte die nicht nahe der Linie liegen, zeigen in der Regel signifikante Effekte auf - je weiter entfernt, desto signifikanter.

Dabei beschreibt die Lage der Punkte die Richtung des Effektes - Punkte rechts der Linie beschreiben einen positiven Effekt des Faktors, Punkte links der Linie einen negativen.^a

^aQuelle: [17]

Kapitel 3

Versuchsplan

In diesem Kapitel wird das vorherrschende Problem erläutert und an jeweils einem Beispiel beschrieben. Desweiteren wird der auf Grundlage des DoE entstandene Versuchsplan vorgestellt.

3.1 Bestehendes Problem

Bei dem vorherrschenden Problem handelt es sich um die Streuung der Auspresskräfte der Magnete aus den Taschen der LP und die bei deren Messung aufgezeichneten unterschiedlichen Kraft/Weg-Kurven. Diese Kräfte zeigen auf, wie viel Kraft aufgewendet werden muss, um einen Magneten aus der Tasche herauszudrücken. Zu der Überprüfung der Qualität und zu deren Sicherung, der im Serienprozess hergestellten LP, werden Auspressvorgänge durchgeführt. Sie dienen dazu, die geforderte Mindesthaltekraft der Magnete in den Taschen zu überprüfen. Es gilt die Ursachen der dabei auftretenden Probleme zu verstehen und zu untersuchen. Die Zahl der Einflussgrößen, die eine mögliche Ursache darstellen können, ist groß, daher bedarf es einem großen Zeitaufwand Untersuchungen anzustellen. Jedoch sind nicht alle Faktoren beeinflussbar und damit analysierbar. Welche Faktoren einen Einfluss auf die Streuung haben könnten, wurden von mir in einer Grafik dargestellt.

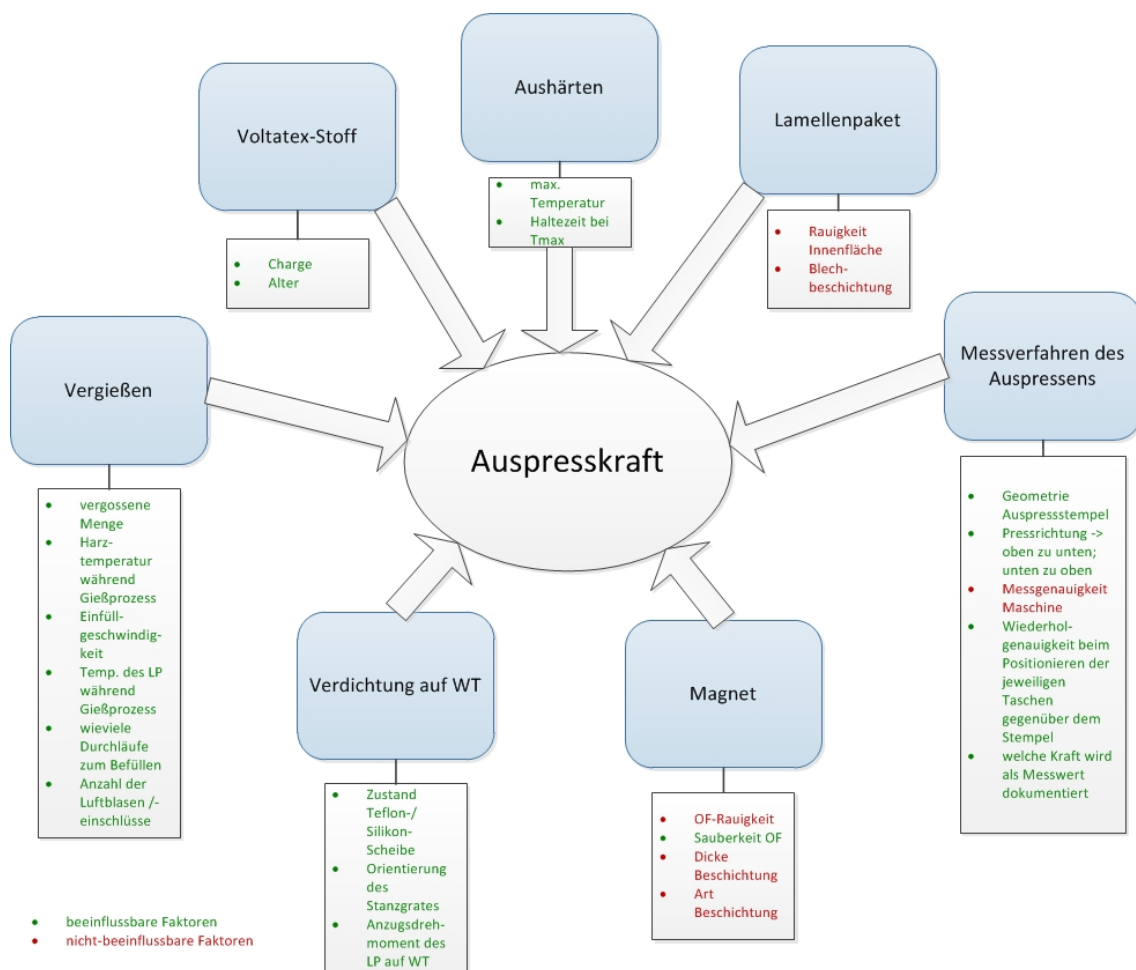


Abbildung 3.1: Übersicht Einflüsse Auspresskraft

3.2 Beispiel über die Streuung der Auspresskräfte und die Unterschiedlichkeit der Kurvenverläufe

Beispiel für die Streuung der Auspresskräfte:

Die in Abb. 3.3 dargestellten 9 LP gehen auf einen Versuch zurück, welcher von der Abteilung HiP/MOE (Fertigungsausführung und -planung für Hybrid, Generator und Großstarter) beauftragt und in Zusammenarbeit durchgeführt worden ist und bei dem ein möglicher Einfluss auf die Auspresskraft untersucht wurde. Hierbei gab es die Annahme, dass der zurückgelegte Weg eines jeden auf die Welle aufgedrückten Lamellenpaketes einen Einfluss auf die Kraft des Auspressens besitzt.

Auf solch eine Welle werden 6 LP aufgedrückt. Dabei gestaltet sich die hier gewählte Nummerierung wie folgt:

- die Lamellenpakete 1 bis 6 wurden auf eine Welle aufgedrückt
- LP 1 war das Paket, welches als erstes aufgedrückt wurde und somit den weitesten Weg dieses Vorganges zurücklegte
- folglich war LP 6 das Paket, dass zuletzt auf die Welle gedrückt wurde und daher den kürzesten Weg aufwies
- die LP 7 bis 9 wurden nicht aufgedrückt und dienten als Vergleich (unaufgedrückter Neuling)

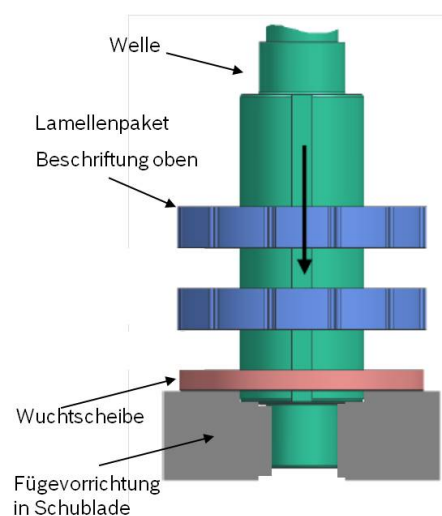


Abbildung 3.2: Schema Aufpressen von LP auf eine Welle (Quelle: [1])

Nachdem die LP 1 bis 6 aufgedrückt wurden, sind diese von der Welle abgezogen worden und das Auspressen der Magnete konnte nun vollzogen werden.

Fazit dieses Versuches:

- die Auspresskräfte aller 9 ausgepressten LP streuen sehr stark (große Differenz zwischen F_{Max} und F_{Min})
- die Mittelwerte der Auspresskräfte streuen weniger stark
- eine Abhängigkeit bezüglich des zurückgelegten Weges bei dem Aufpressen eines LP auf eine Welle und den dabei aufgetretenen Kräften des Auspressens ist nicht sichtbar

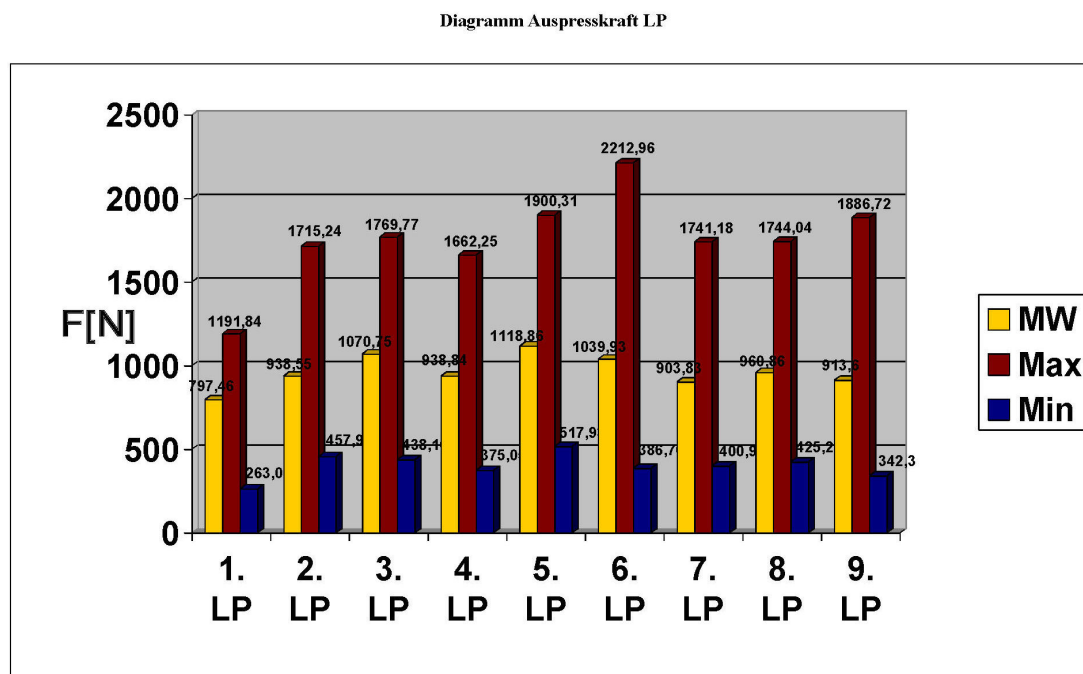


Abbildung 3.3: Übersicht Streuung

Balkendiagrammdarstellung von Auspressversuchen von 9 LP:

- zu sehen ist die bei jedem LP auftretende große Differenz (Streuung) zwischen F_{Max} (in N) und F_{Min} (in N) der 24 einzelnen Magnete im jeweiligen Paket

Beispiel für die Unterschiedlichkeit der Kurvenverläufe:

Die nachfolgende Grafik zeigt die bei den Auspressvorgang aufgenommenen unterschiedlichen Kurvenverläufe. Alle 4 dargestellten Kraft/Weg-Kurven treten innerhalb eines Lamellenpaketes auf und stellen nur eine Auswahl derer dar, die ebenfalls bei einem LP während des Auspressens aufgezeichnet worden sind. Eine Bewertung in Hinsicht auf den Bruchpunkt des Harzes einer Kurve wird durch diese große Anzahl an verschiedenen Kurven stark erschwert, bzw. macht es fast unmöglich. Es lässt sich sehr schwer sagen, ob beispielsweise ein kleiner Peak im Anstieg der Kurve schon den Punkt des Brechens beschreibt, oder erst das Maximum diesen darstellt. Die bisher als Bruchstellen gewählten Punkte beruhen auf der Festlegung, dass das erste Maximum im Kurvenverlauf einen solchen Bruchpunkt beschreibt. Dieser gewählte Punkt wurde in den nachfolgenden 4 Kurvenbeispielen als $F_{\max}(\text{gewählt})$ markiert.

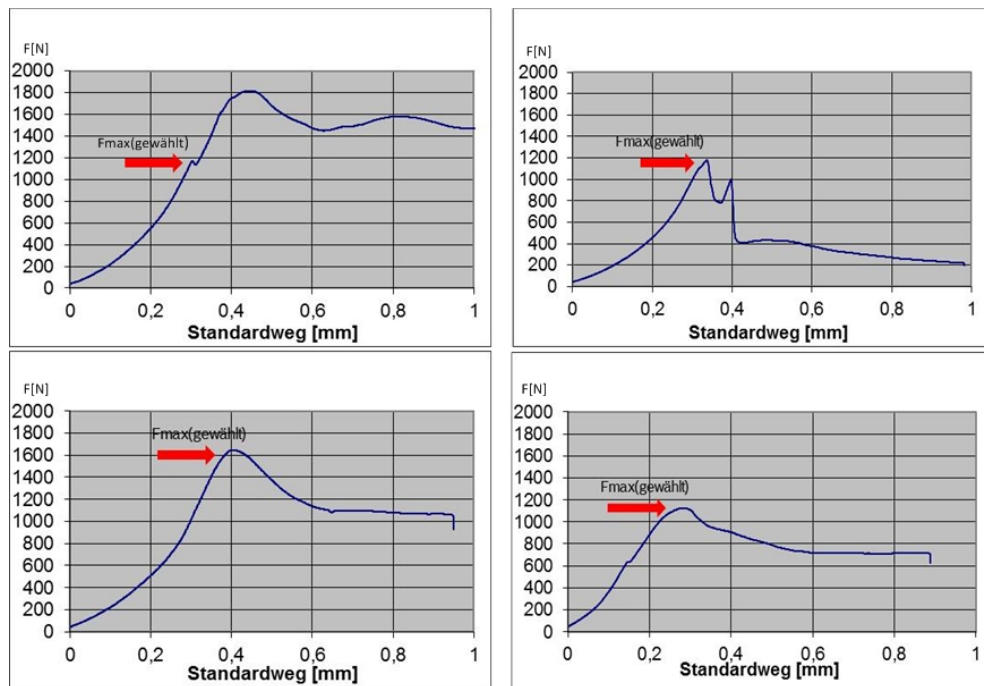


Abbildung 3.4: Kurven Auspressvorgang

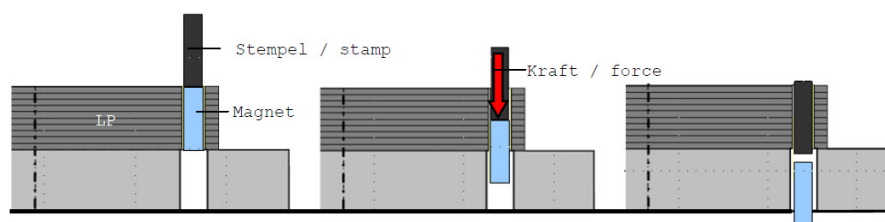


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des Auspressvorganges (Quelle:[1])

3.3 Vollständig faktorieller Versuchsplan 2^3

Es werden zunächst 3 beeinflussbare Faktoren gewählt, die nach vorangegangener Diskussion und Erfahrung die wohl größten Einflüsse in Bezug auf die Streuung der Auspresskräfte und der damit verbundenen unterschiedlichen Auspresskraftkurven haben könnten. Bei diesen Faktoren wird jeweils ein dem Serienprozess positiv und negativ veränderter Wert festgelegt.

Faktor X1		Faktor X2		Faktor X3	
A	-1	A	-1	A	-1
	0		0		0
B	+1	B	+1	B	+1

Negativ veränderter Wert gegenüber Serienprozess
Positiv veränderter Wert gegenüber Serienprozess

Abbildung 3.6: Beispielübersicht - Dem Prozess positiv- und negativ-veränderte Parameter

Um auch alle möglichen bestehenden gegenseitigen Wechselwirkungen zu erkennen, wurde die in Kapitel 2 beschriebene Methode des DoE (Design of Experiments) gewählt.

Es sind 3 Faktoren mit jeweils 2 verschiedenen Stufen vorhanden. Somit entstehen nach Vorbild des "vollständigen faktoriellen Versuchsplanes 1. Ordnung vom Typ 2^n " 8 Versuchsläufe. Diese Ablaufreihenfolge gestaltet sich wie folgt dargestellt:

1. A A A
2. A A B
3. A B A
4. A B B
5. B A A
6. B A B
7. B B A
8. B B B

Diese 8 unterschiedlichen Kombinationen werden in doppelter Ausführung durchgeführt, um etwaige Unterschiede und Abweichungen der einzelnen Läufe feststellen zu können.

Kapitel 4

Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung

In diesem Kapitel wird die Versuchsdurchführung betrachtet und dargestellt. Neben der Darstellung des Vorversuches und der durchgeführten Versuchsreihen erfolgt auch eine Analyse der Auspressvorrichtung sowie eine Verbesserung der zu dem Auspressen verwendeten Vorrichtung. Eine Auswertung der Versuchsreihen ist ebenfalls Bestandteil dieses Kapitels.

4.1 Analyse und Verbesserung der Auspressvorrichtung

Da eine Vielzahl von Einflussfaktoren existieren, die auf die Auspresseigenschaften wirken, ist es zunächst wichtig zu unterscheiden, welche der Einflüsse sich auf den Verklebeprozess und welche sich auf den Auspressvorgang auswirken. Folgende Tabelle zeigt eine kleine Auswahl der Einflussfaktoren, zugeordnet zu ihren Ort der Einflussnahme:

Einflüsse auf den Verklebeprozess	Einflüsse auf den Auspressvorgang
<i>vergossene Harzmenge</i>	<i>Geometrie Auspressstempel</i>
<i>Anzugsdrehmoment des LP auf dem WT</i>	<i>Positioniergenauigkeit des Stempels gegenüber Tasche</i>
<i>Vorwärmtemperatur und damit Temp. während des Vergießprozesses</i>	<i>Auspressvorrichtung hinsichtlich ihrer Geometrie</i>

Abbildung 4.1: Zuordnung von Einflussfaktoren auf Auspressversuche

Die Untersuchung der Einflüsse auf den Auspressvorgang wirkenden Faktoren ist dabei ein nicht zu vernachlässigender Punkt auf dem Weg zur Lösung der in der Zielsetzung stehenden Aufgabe.

Zunächst wurde eine Analyse der alten Auspressvorrichtung durchgeführt und Verbesserungsvorschläge in ihrer Machbarkeit diskutiert. Die Ausgangssituation stellte sich wie folgt dar:



Abbildung 4.2: Auspressvorrichtung - Ansicht von oben

In Abb. 4.2 ist der WT der Auspressvorrichtung zu sehen. Die dabei rot markierten Punkte im Bild stellen Orte der Veränderung dar. Die mit einer 1 markierte Stelle

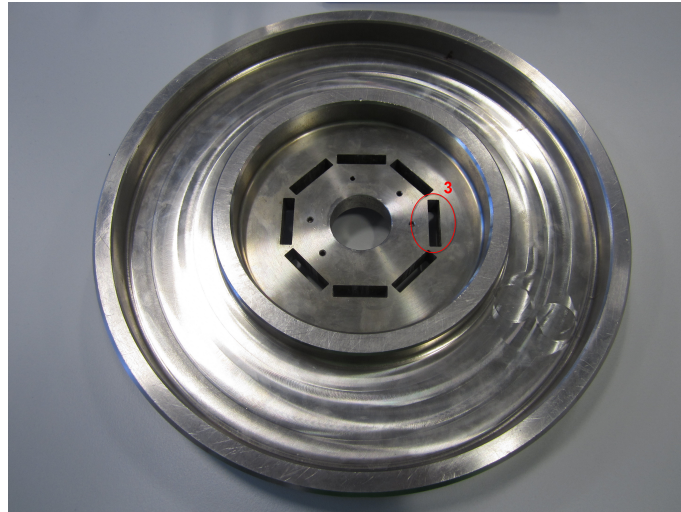


Abbildung 4.3: Auspressvorrichtung - Ansicht von unten

zeigt eine Änderung der Fase der Auspressöffnung. Hierbei erfolgte eine Änderung von $0,5 \times 45^\circ$ auf $1,0 \times 45^\circ$. In den in der Mitte befindlichen und mit 2 markierten Lochdurchmesser ist vorgesehen, einen Adapter mit einem M12 Gewinde einzusetzen, um das später auf dem Träger befindliche LP mit einer zusätzlichen Zentrierplatte festzuziehen (Anlegen eines Spannmomentes).

Auf der in Abb. 4.3 dargestellten Unterseite ist eine 3. Änderungsstelle eingezeichnet. An dieser Stelle wird eine Verbreiterung der Öffnung nach Außen angestrebt. Es soll dabei als Ergebnis dieser 3 Änderungen ein Vermeiden von Verkantungen oder Anstößen der Magnete während des Auspressens erzielt werden. Nachfolgende schematische Übersicht zeigt die Änderungen 1 und 3:

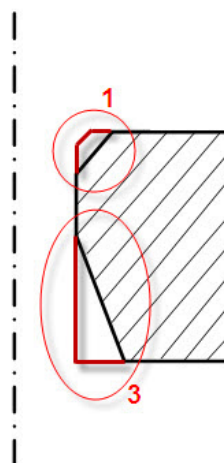


Abbildung 4.4: Schema der Auspressvorrichtung mit eingezeichneten Änderungen

Ein weiteres für den Auspressvorgang benötigtes und wichtiges Teil ist der Auspressstempel. Er überträgt die Kraft der Maschine auf den Magneten und bildet somit ein wichtiges Bindeglied im gesamten Auspressvorgang. Auch dieses Bauteil wurde einer Überarbeitung unterzogen. Die Überarbeitung selbst vollzog sich nicht in Form einer Änderung an dem bestehenden Stempel selbst, sondern bestand in der Herstellung zweier neuer Stempel. Einer dieser 2 neuen Stempel wurde in seiner Form und Dimension dem des Bestehenden nachempfunden. Der Zweite jedoch wurde in seiner Dimension verkleinert, behielt allerdings die Form des alten vorhandenen Stempels bei. Grund für eine kleinere Version des Stempels ist die Annahme, dass die kleinere Fläche eine intensivere Kraftausübung während des Auspressens auf den Magneten ausübt und zusätzlich durch die geringeren Abmaße ein Anstoß bzw. Verkanten des Stempels bei dem Eintauchen während des Auspressvorganges weitgehend verhindert wird. Alle 3 verschiedenen Stempel sind in Abb. 4.5 zusehen:

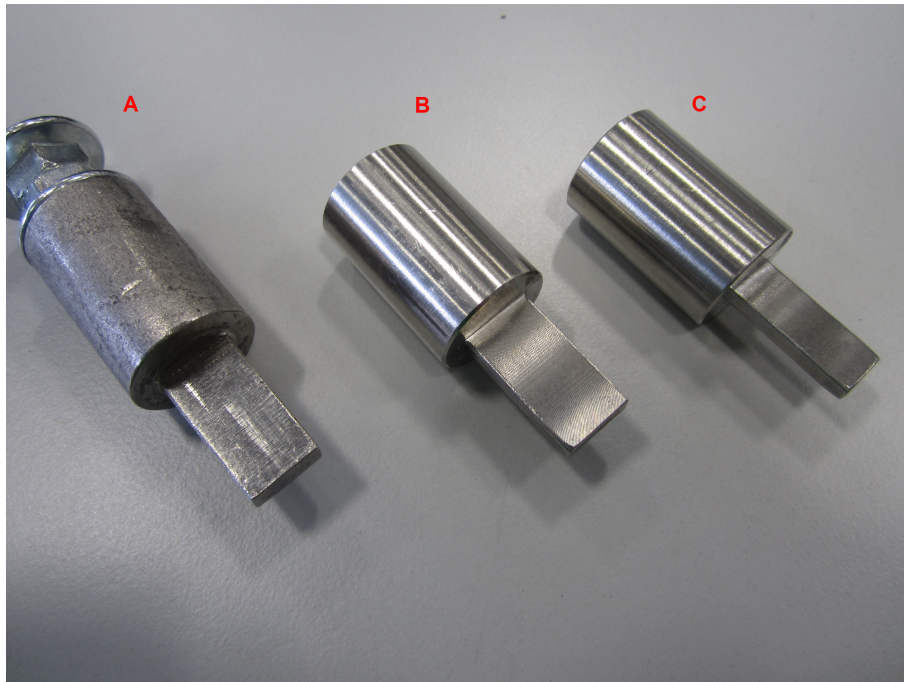


Abbildung 4.5: Auspressstempel

- A: vorhandener Auspressstempel - *stark beschädigt (Ausbrüche, Deformationen)*
- B: neuer Auspressstempel - *Form und Dimension identisch wie Stempel A*
- C: neuer Auspressstempel - *Form identisch wie Stempel A, Abmaße jedoch kleiner als Stempel A*

Der Werkstoff, aus dem die Auspressvorrichtung sowie die Stempel gefertigt sind, ist ein Austenitischer Stahl mit der Bezeichnung X8CrNiS18-9. Es besteht somit eine Rostbeständigkeit. Desweiteren ist dieses Material nichtmagnetisch¹, welches einen Vorteil in Hinsicht auf die Auspressbarkeit von Magneten mit sich bringt, da auch LP im aufmagnetisierten Zustand somit untersucht werden können.

Die komplette Auspressanlage ist im nachfolgenden Bild dargestellt und zeigt die Auspressmaschine der Firma „Zwick/Roell“ vom Typ Z250²:



Abbildung 4.6: Auspressmaschine Z250 der Firma Zwick/Roell

¹Quelle: [18]

²Z250 bedeutet, dass die maximale Prüfkraft dieses Maschinentypes 250kN beträgt.

4.2 Vorversuch

Es wurde zunächst eine Versuchsreihe geplant und durchgeführt, welche zum einen schon die in späteren Versuchen festgelegten Einflussfaktoren beinhaltet, und zum anderen in ihrer Auswertung schon Hinweise liefern sollte, welcher Faktor den scheinbar größten Einfluss auf die Auspresskraft besitzt.

Die Einflussfaktoren und Parameter gestalteten sich wie folgt:

Vorwärmtemperatur		Harzmenge		Drehmoment	
A	45°C	A	0,1g	A	10Nm
	60°C		0,15g		13Nm
B	90°C	B	0,2g	B	16Nm

Negativ veränderter Wert gegenüber Serienprozess

Positiv veränderter Wert gegenüber Serienprozess

Abbildung 4.7: Einflussfaktoren und Parameter im Vorversuch

Wie im Abschnitt „Erstellter Versuchsplan“ vorgestellt, erfolgte die Abarbeitung des Durchlaufes analog der in diesem Abschnitt nummerierten Ablaufreihenfolge.

Zunächst erfolgte eine Auswertung mittels Microsoft Excel. Die daraus entstandene Grafik ist in Abb. 4.8 dargestellt.

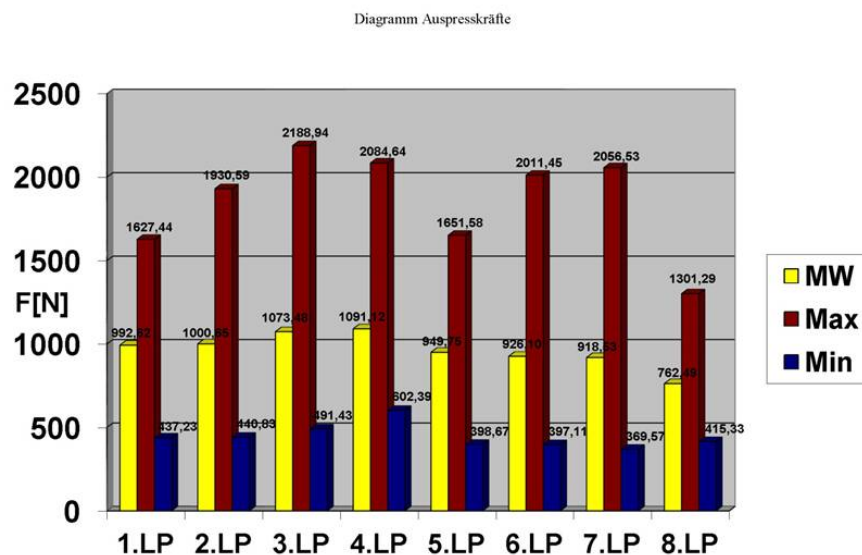


Abbildung 4.8: Diagramm über die Auspresskraft im Vorversuch

In diesem Diagramm erkennbar ist die niedrigere mittlere Kraft bei 90°C Vorwärmen im Vergleich zu 45°C vorgewärmten LP. Ebenso erkennbar ist die dabei wieder auftretende große Streuung zwischen F_{Max} und F_{Min} .

Eine weitere Auswertung, mittels Minitab, ergab die in Abb. 4.8 dargestellte Übersicht.

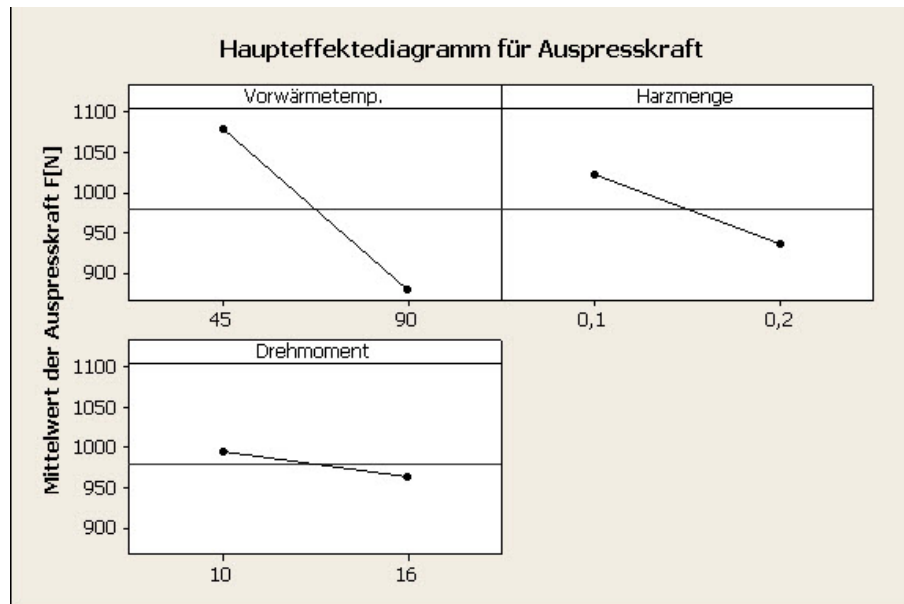


Abbildung 4.9: Haupteffektdiagramm der Auspresskraft im Vorversuch

Anhand dieser Grafik lässt sich gut erkennen, dass die Vorwärmtemperatur den scheinbar größten Einfluss auf die Auspresskräfte besitzt, der Einfluss der Harzmenge geringer ausfällt und das Drehmoment den wohl kleinsten Einfluss ausübt. Die Größe der Neigung markiert hierbei die Stärke der Beeinflussung. Die Einheiten der horizontalen Achsen ist dabei für die Vorwärmtemperatur „°C“, die Angabe der Harzmenge erfolgt in „g“ und das Drehmoment ist in „Nm“ angegeben.

4.3 1. Versuchsreihe

In dieser 1. Versuchsreihe wird die Auspresskraft von 16 LP untersucht. Dabei sind die im Vorversuch bearbeiteten Faktoren beibehalten und nur die Werte dieser Faktoren verändert worden. Hintergrund dieser Änderung ist der Bezug auf eine Fertigungs- und Prüfanweisung (FuP) der Firma Bosch. Als Grundlage wurde hierbei die FuP der LP vom Typ SMG-180 verwendet. Diese unterscheiden sich im Gegensatz zu LP des Typ SMG-138 lediglich in der Größe der LP - in diesen finden 24 anstatt 16 Magneten Platz. Somit ist eine Absicherung auf eine größere Geometrie von LP in Hinsicht auf die geplanten Versuche erfolgt. Die aus dieser Änderung entstandene Übersicht ist folgend dargestellt:

Vorwärmtemperatur		Harzmenge		Drehmoment	
A	52°C	A	0,188g	A	10Nm
	80°C		0,264g		13Nm
B	108°C	B	0,340g	B	16Nm

Negativ veränderter Wert gegenüber Serienprozess

Positiv veränderter Wert gegenüber Serienprozess

Abbildung 4.10: Einstellparameter 1. Versuchsreihe

Diese 1. Versuchsreihe wird dabei in 2 Durchläufe mit jeweils 8 Versuchsläufen unterteilt und durchgeführt. Jedes LP wird bei 165°C 60 Minuten im Ofen ausgehärtet.

4.3.1 1. Durchlauf

Auswertung mittels Microsoft Excel:

Als erstes wurde ein Balkendiagramm in Excel erstellt, in welchem die maximalen, minimalen und Mittelwerte der Kräfte von jedem LP abgebildet sind. LP 1-4 sind die LP mit der kleineren Vorwärmtemperatur von 52°C, LP 5-8 mit der größeren Vorwärmtemperatur von 108°C. Auffällig ist dabei eine „Talbildung“ der mittleren Kräfte der ersten 4 LP und eine „Gipfelbildung“ der LP 5-8, sodass sich das Bild einer „Schlangenlinie“ über alle LP bildet. Die große Streuung der Auspresskräfte ist ebenfalls wieder ersichtlich.

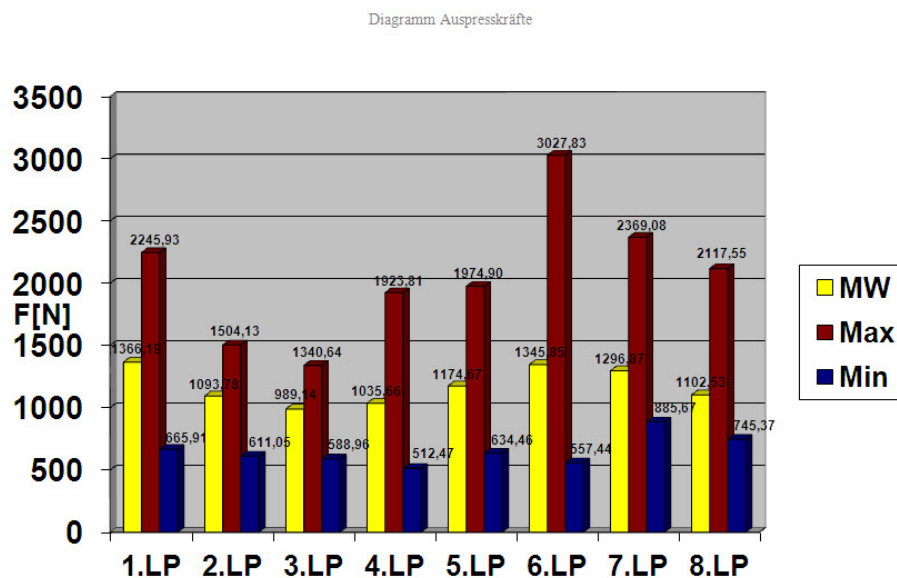


Abbildung 4.11: Diagramm über die Auspresskraft der ersten Versuchsreihe - erster Durchlauf

Auswertung mittels Minitab 16:

Zunächst wurden die aufgenommenen Kräfte des 1. Durchlaufes auf Normalverteilung untersucht.

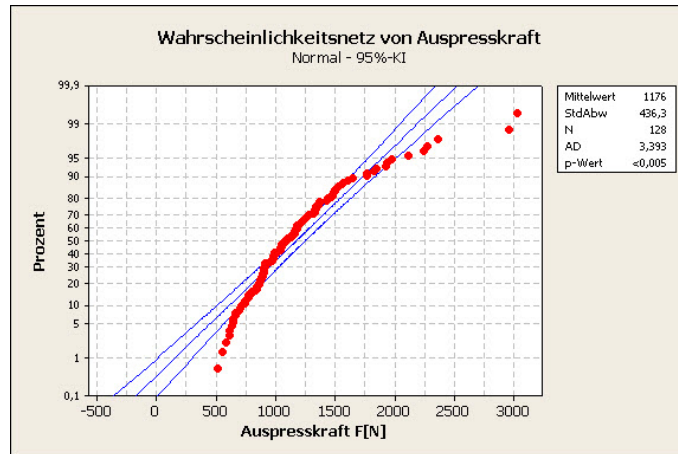


Abbildung 4.12: Erster Versuchsplan Erste Versuchsreihe Wahrscheinlichkeitsnetz

Abbildung 4.12 zeigt das Wahrscheinlichkeitsnetz der Auspresskräfte. Es ist zu erkennen, dass die Summe der relativen Häufigkeiten keiner Geraden folgt, sondern in ihrer Form einen Bogen beschreibt. Damit liegt keine Gauß'sche Normalverteilung vor. Diese gewonnene Erkenntnis wird ebenfalls durch nachfolgende Abb. 4.13 gestützt, in dem die Kurve des Histogrammes keine typische Glockenform aufweist. Vielmehr folgt eine in das Histogramm möglich einzeichnenbare Kurve in ihrer Form einer logarithmisch-normalverteilten Linie.

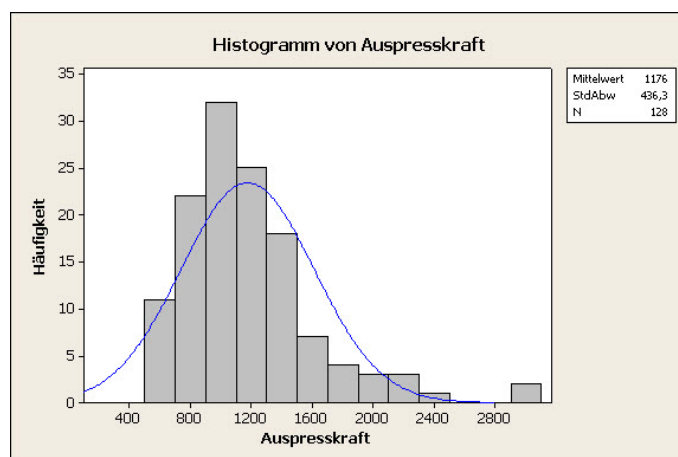


Abbildung 4.13: Erster Versuchsplan Erste Versuchsreihe Histogramm

Es folgte als nächster Schritt eine Untersuchung auf Signifikanz der Faktoren. Ergebnis dieser Analyse ist, dass allein alle 3 Faktoren zusammen einen signifikanten

Effekt aufweisen.³

Belegt wird dieses Ergebnis durch nachfolgendes Pareto-Diagramm, in welchem allein der Term ABC (Wechselwirkung der Faktoren Vorwärmtemperatur, Harzmengenge und Drehmoment) die rote Markierung überschreitet - ebenfalls in der Grafik des „Wahrscheinlichkeitsnetzes für standardisierte Effekte“ durch einen roten Punkt zu erkennen. Desweiteren lässt sich in der Darstellung der Abb. 4.15 die Richtung des signifikanten Effektes untermauern, welche dem, des ausgegebenen Wertes des Effektes in Anhang B.1 entspricht. So ist zu erkennen, dass der signifikante Term ABC links der eingezeichneten Linie liegt und somit einen negativen Effekt aufweist. Dies bedeutet wiederum, dass eine tiefe bzw. negative Faktoreinstellung zu einem hohen Wert der Antwortvariable führt, in diesem Fall die Auspresskraft.

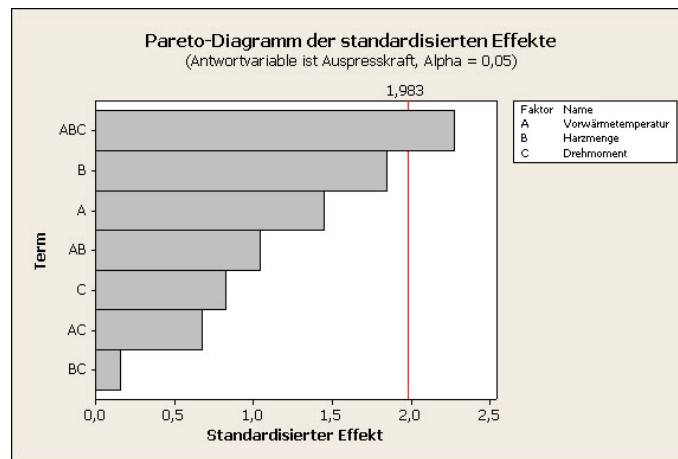


Abbildung 4.14: Erster Versuchsplan Erste Versuchsreihe Pareto

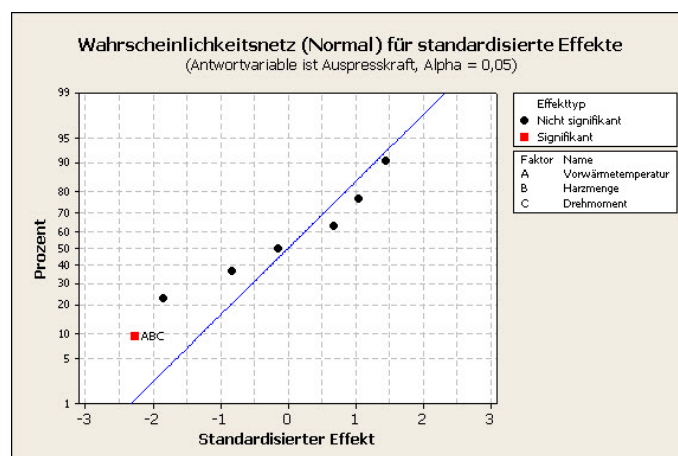


Abbildung 4.15: Erster Versuchsplan Erste Versuchsreihe Wahrscheinlichkeitsnetz für Effekte

³Vgl. Anhang B.1

Desweiteren wurden die Haupteffekte in ihrer Wirkung und damit in der Richtung des durch sie verursachten Effektes analysiert.

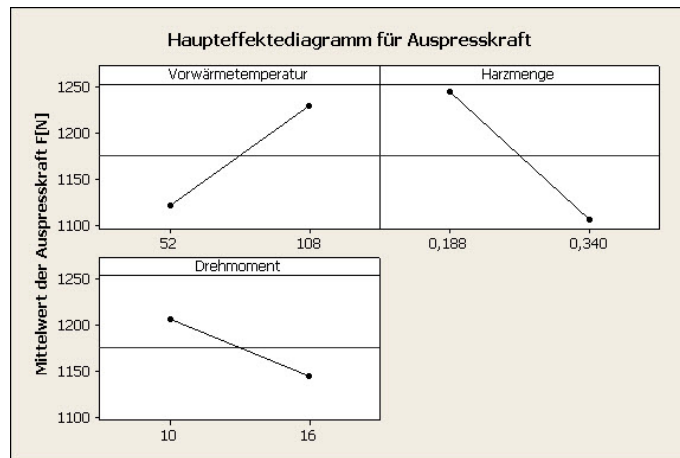


Abbildung 4.16: Erster Versuchsplan Erste Versuchsreihe Haupteffektdiagramm

Aus Abb. 4.16 lässt sich so ablesen, dass die Vorwärmtemperatur und die Harzmenge den größten Einfluss ausüben und der Effekt des Drehmomentes am geringsten ausfällt. Im Vergleich zu dem im Vorversuch dargestellten Haupteffektdiagramm ist zu erkennen, dass die Vorwärmtemperatur einen umgekehrten Einfluss zeigt.

Zum Schluss wurde eine Boxplot-Grafik erstellt, in welcher man erkennen kann, dass Ausreißer vorliegen und die Kombinationen 52°C/0,34g/10Nm und 108°C/0,340g/16Nm am günstigsten zu sein scheinen, da dort die Werte in einem kleinen Bereich (Fenster) liegen und somit die geringste Streuung aufweisen. Eine einzelne Box weist dabei folgende Merkmale auf:

- die obere Linie einer Box beschreibt, dass 75% der Werte unter oder gleich ihrem Wert liegen (75% Perzentil bzw. oberes Quartil)
- die mittlere Linie besagt, dass 50% der Werte unter oder gleich ihrem Wert liegen (50% Perzentil bzw. Median)
- die untere Linie jeder Box sagt aus, dass 25% der Werte unter oder gleich ihrem Wert liegen (25% Perzentil bzw. unteres Quartil)
- die Sterne weit außerhalb der Box markieren Ausreißer
- die Linien, welche aus einer Box ober- und unterhalb herausragen, nennt man Whisker - sie beschreiben ebenfalls Punkte von Werten, die allerdings maximal bis das 1,5-fache der Boxenlänge betragen können

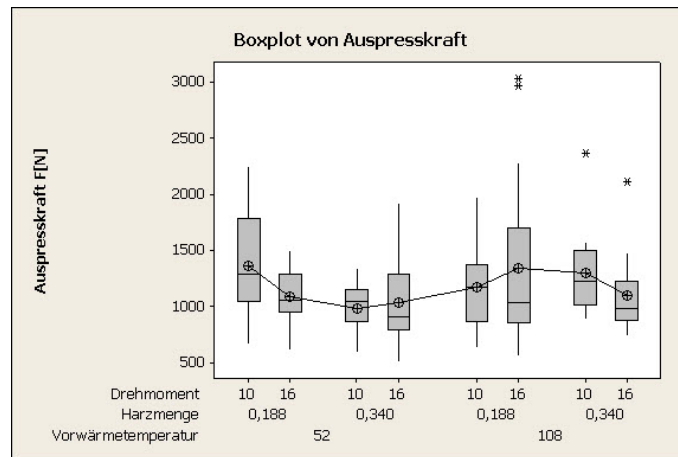


Abbildung 4.17: Erster Versuchsplan Erste Versuchsreihe Boxplot

4.3.2 2. Durchlauf

Auswertung mittels Microsoft Excel:

Es ist zunächst eine wie im 1. Durchlauf dargestellte Übersicht über die Auspresskräfte in Form eines Balkendiagrammes erstellt worden. Zu erkennen ist die typische große Streuung der aufgetretenen Kräfte. Ein Muster über den Verlauf der mittleren Auspresskräfte analog des 1. Durchlaufe ist nicht erkennbar.

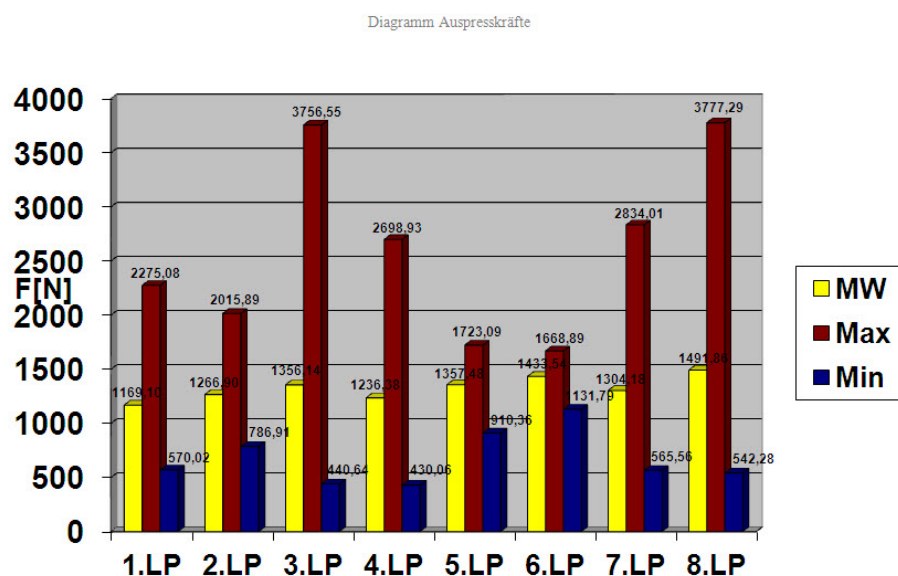


Abbildung 4.18: Diagramm über die Auspresskraft der ersten Versuchsreihe - zweiter Durchlauf

Auswertung mittels Minitab 16:

Eine Untersuchung des 2. Durchlaufes auf Normalverteilung wurde mit Hilfe folgender Grafik des Wahrscheinlichkeitsnetzes realisiert:

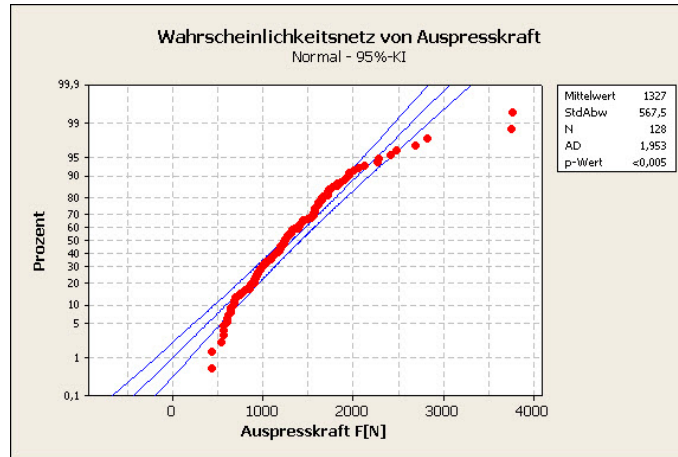


Abbildung 4.19: Erster Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Wahrscheinlichkeitsnetz

Deutlich zu erkennen ist, dass der Verlauf der Summe aller Werte keiner Gerade folgt. Vielmehr beschreiben die Werte eine Kurvenform wie im 1. Durchlauf. Eine Normalverteilung ist somit nicht vorhanden. Gestützt wird diese Schlussfolgerung durch ein erstelltes Histogramm - es ist keine Glockenform der Werteverteilung erkennbar, eher scheint hier ebenfalls analog des 1. Durchlaufes eine logarithmische Normalverteilung vorzuliegen.

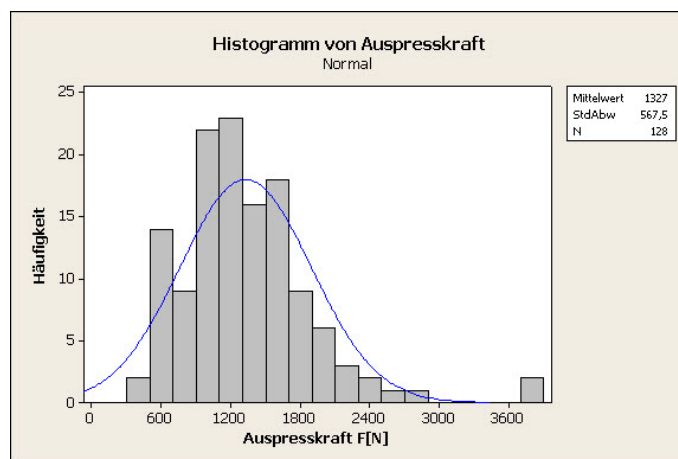


Abbildung 4.20: Erster Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Histogramm

Die Analyse auf signifikante Effekte der Faktoren ergab, dass keine der 3 untersuchten Faktoren eine solche Signifikanz aufweisen.⁴ Mit Hilfe eines ParetoDiagrammes

⁴Vgl. Anhang B.2

sowie des „Wahrscheinlichkeitsnetzes für standardisierte Effekte“ ist dieses Ergebnis ebenfalls sichtbar gemacht worden.

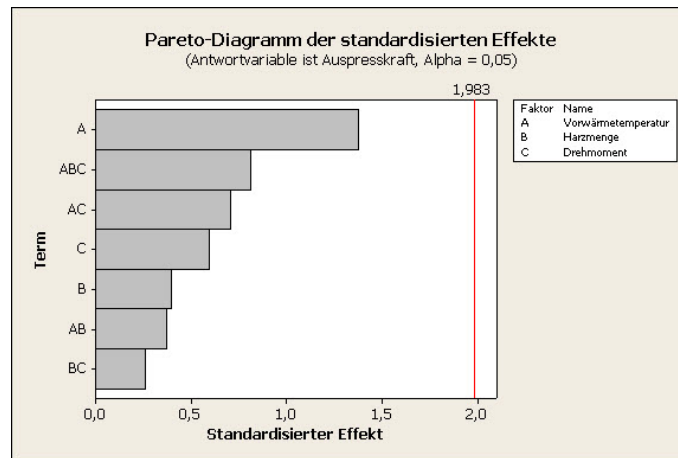


Abbildung 4.21: Erster Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Pareto

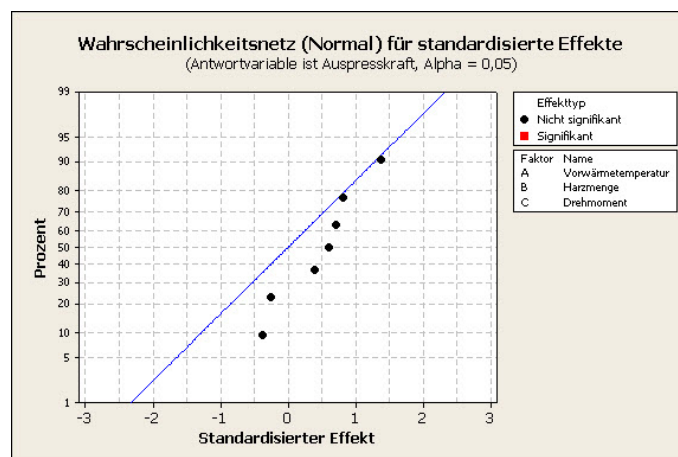


Abbildung 4.22: Erster Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Wahrscheinlichkeitsnetz für Effekte

Ein erstelltes Haupteffektdiagramm des 2. Durchlaufes lieferte folgendes Ergebnis:

Die Vorwärmtemperatur zeigt den größten Einfluss, ihre Tendenz folgt analog der des 1. Durchlaufes. In ihrem Effekt schwächer aufgetreten ist die Harzmenge und das Drehmoment, dabei folgt die Tendenz in ihrer Richtung der Vorwärmtemperatur - genau entgegen der im 1. Durchlauf aufgetretenen Richtung der Effekte.

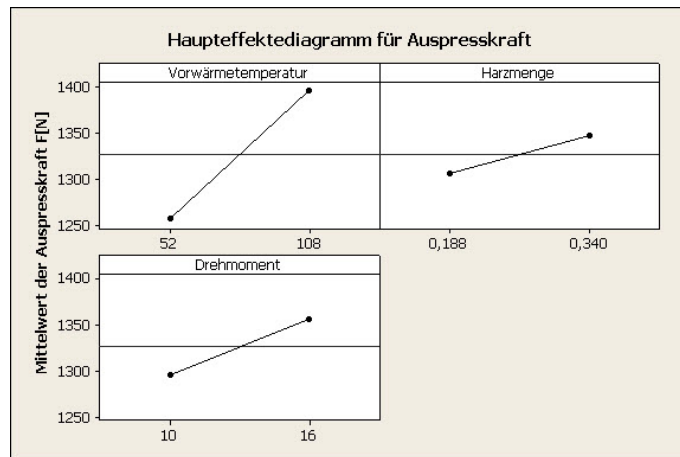


Abbildung 4.23: Erster Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Haupteffektdiagramm

Eine Überprüfung, welche Faktorkombinationen am günstigsten erscheinen, lieferte analog des 1. Durchlaufes eine Boxplot-Grafik. Neben der Sichtbarkeit von aufgetretenen Ausreißern sind in diesem Durchlauf die Kombinationen 108°C/0,188g/10Nm und 16Nm am günstigsten. Die bei diesen Kombinationen aufgetretene Streuung ist am kleinsten und die Position der mittleren Kräfte der Boxen hoch.

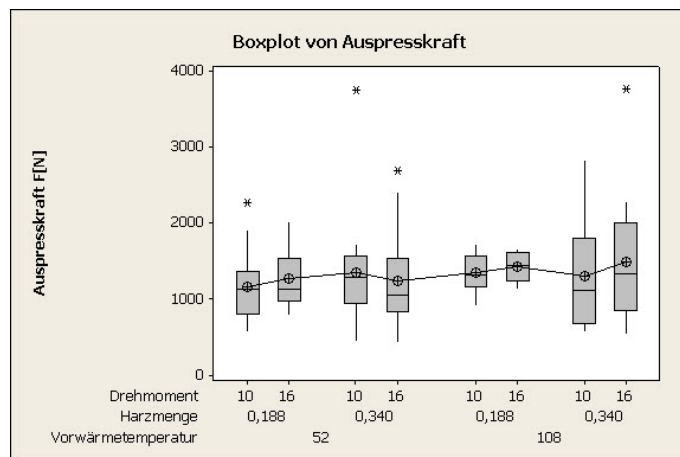


Abbildung 4.24: Erster Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Boxplot

4.3.3 Vergleich der Durchläufe 1 und 2

Wenn man beide Durchläufe vergleicht, so kann man Gemeinsamkeiten wie auch große Unterschiede feststellen. Als Gemeinsamkeiten lassen sich folgende Ergebnisse nennen:

- es liegen sowohl im 1. als auch im 2. Durchlauf keine Gauß'schen Normalverteilungen vor, die Summe aller Werte im Wahrscheinlichkeitsnetz ist in ihrer Form und Verteilung hinsichtlich Ausreißer als annähernd identisch anzusehen
- es liegen keine signifikanten Effekte der Terme A, B, C sowie AB, AC, und BC vor
- der Haupteffekt der Vorwärmetemperatur ist in beiden Durchläufen etwa gleich stark und in gleicher Tendenz verlaufend

Die Unterschiede gestalten sich wie folgt:

- im 1. Durchlauf ist allein der Term ABC in seinen Effekten signifikant auffällig, dagegen im 2. Durchlauf ist auch dieser als nicht-signifikant nachgewiesen
- die Haupteffekte der Harzmenge und des Drehmomentes sind in ihrer Tendenz umgekehrt, ebenfalls ist der Effekt der Harzmenge im 2. Durchlauf schwächer als im 1. Durchlauf
- die im 1. Durchlauf in der Boxplot-Grafik abgelesenen günstigen Faktorkombinationen sind im 2. Durchlauf weniger günstig

Wie können nun solche Unterschiede, vor allem in den Haupteffekten auftreten?

Es sind in beiden Durchläufen jeweils nur die Vorwärmetemperatur, die Harzmenge und das Drehmoment als Faktor verändert worden. Das Aushärten aller LP erfolgte dabei im gleichen Ofen bei 165°C und einer Dauer von 60 Minuten. Zum Sicherstellen, dass die LP sowie der Ofen seine Temperatur erreicht, wurde mit Hilfe eines Temperatur-Zeit-Datenloggers dieses überprüft. Ebenso ist die Menge an vergossenen Harz durch vorheriges Justieren des Dosiermessgerätes sichergestellt worden. Somit sind diese Faktoren als Ursache auszuschließen und es müssen damit Faktoren in Betracht gezogen werden, die außerhalb der Beeinflussbarkeit liegen.

Hierbei ergaben Überlegungen folgende mögliche Störgrößen:

- unterschiedlich ausgehärtetes Harz durch etwaige Liegezeiten der LP (Einfluss von Licht, Luftfeuchte, Temperatur, Abkühlzeiten nach Ofenentnahme)
- unterschiedlich in den Taschen positionierte Magnete
- durch Auspressvorgang eingebrachte Streuung
- Einflussgrößen, welche bisher als nicht signifikant angesehen worden, beispielsweise Ausgangseigenschaften des Harzes (Temperatur des Harzes beim Vergießen und damit seine Ausgangsviskosität,...)

4.4 2. Versuchsreihe

Die 2. Versuchsreihe bezieht sich im Gegensatz zu der durchgeführten 1. Versuchsreihe nicht auf Einflussfaktoren die mit dem Verklebeprozess in Verbindung stehen, sondern sie beinhaltet Faktoren, die mit der Auspressvorrichtung in direktem Kontakt stehen. Folgende Faktoren wurden dabei in den Versuchsplan aufgenommen:

- Auspressgeschwindigkeit
- Stempel
- festgezogenes Drehmoment des LP auf der Auspressvorrichtung (Spannmoment)

Die nachfolgende Grafik zeigt den für die 2. Versuchsreihe bestehenden Versuchsplan, welcher ebenfalls nach dem Vorbild des „vollständigen faktoriellen Versuchsplanes 1. Ordnung vom Typ 2^n “ in zweifacher Ausführung durchgeführt wurde.:

Auspressgeschwindigkeit		Stempel		Spannmoment	
A	2mm/min	A	groß	A	0Nm
	10mm/min				
B	18mm/min	B	klein	B	16Nm

Negativ veränderter Wert gegenüber Serienprozess
 Positiv veränderter Wert gegenüber Serienprozess

Abbildung 4.25: Einstellparameter 2. Versuchsreihe

Das Verkleben der LP wurde nach Serienparametern realisiert.:

Faktoren	Werte
Vorwärmetemperatur	80°C
Harzmenge	0,264g
Drehmoment	13Nm
Ofentemperatur	165°C
Ofenzeit	60min

Tabelle 4.1: Serienparameter

4.4.1 1. Durchlauf

Auswertung mittels Microsoft Excel:

Die Auswertung der 2. Versuchsreihe folgte in ihrer Analyse der Reihenfolge der 1. Versuchsreihe. Das mittels Excel erstellte Balkendiagramm für den 1. Durchlauf ist nachfolgend abgebildet. Es lässt sich, wie auch schon in der 1. Versuchsreihe erkennbar, die große Streuung der Kräfte erneut feststellen. Desweiteren auffällig ist die Zunahme der mittleren Kraft vom 1. LP hin zu dem letzten LP 8. Als erste Folge kann man damit sagen, dass die Kombination der LP 7 und 8 in Hinsicht auf die erreichten mittleren Kräfte am günstigsten erscheinen.

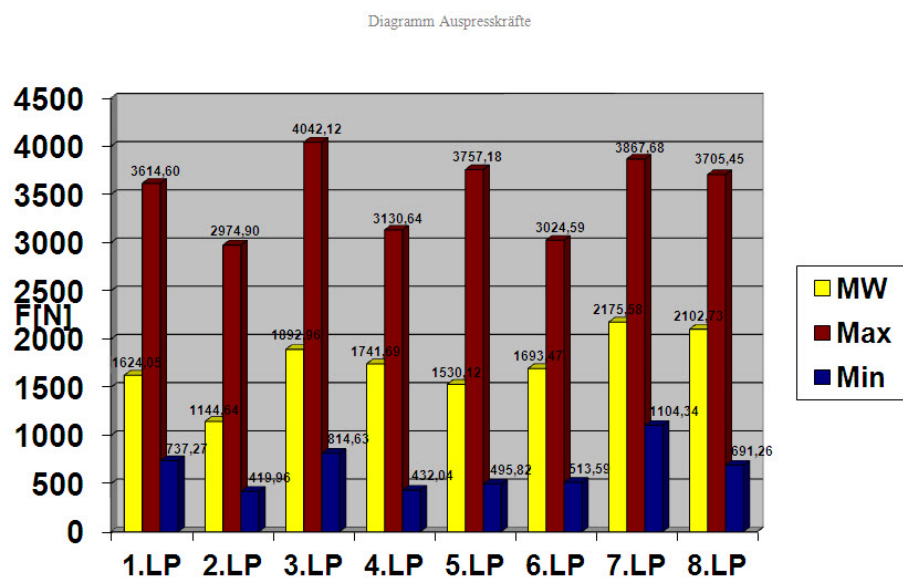


Abbildung 4.26: Diagramm über die Auspresskraft der zweiten Versuchsreihe - erster Durchlauf

Auswertung mittels Minitab 16:

Die Untersuchung auf Normalverteilung der Werte gab dabei folgenden Aufschluss:

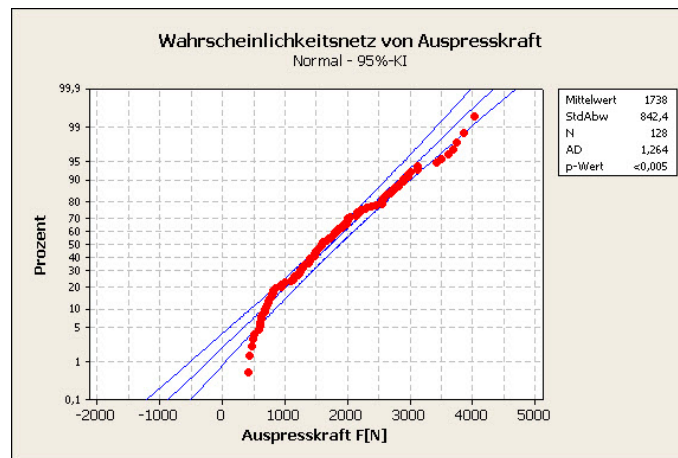


Abbildung 4.27: Zweiter Versuchsplan Erste Versuchsreihe Wahrscheinlichkeitsnetz

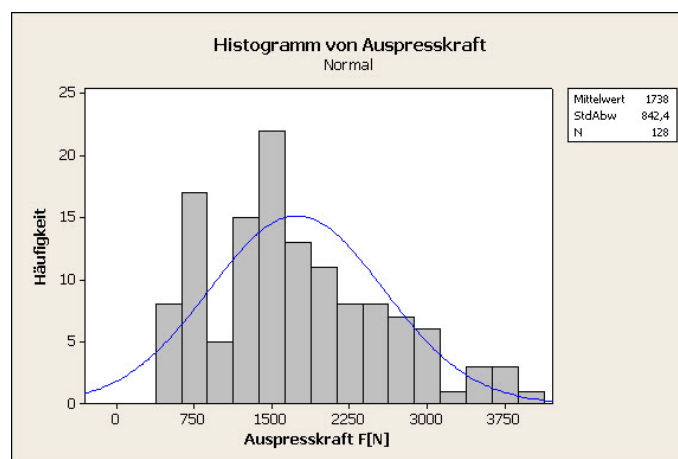


Abbildung 4.28: Zweiter Versuchsplan Erste Versuchsreihe Histogramm

In der Abbildung des Wahrscheinlichkeitnetzes wie auch in dem erstellten Histogramm lässt sich erkennen, dass in diesem 1. Durchlauf der 2. Versuchsreihe keine Gauß'sche Normalverteilung der Werte vorliegt. Die Summe aller Werte im Wahrscheinlichkeitsnetz folgt keiner Gerade und auch das Histogramm zeigt nicht die für eine Normalverteilung typische Glockenkurve. Auch hier beschreibt eine mögliche Linie eher die Form logarithmisch-normalverteilter Werte.

Die danach erfolgte Untersuchung auf Signifikanz wies in ihrem Ergebnis auf einen signifikanten Effekt der Terme B und A hin⁵. Mit Hilfe eines Pareto-Diagrammes sowie eines weiteren Wahrscheinlichkeitnetzes wurde diese Erkenntnis belegt. Dabei ist

⁵Vgl. Anhang B.3

in dem erstellten Pareto-Diagramm eine Überschreitung der roten Markierung der Balken der Terme B und A ersichtlich. In dem zusätzlich erstellten Wahrscheinlichkeitsnetz sind diese beiden Terme ebenfalls als rot und signifikant dargestellt. Eine weiterer Fakt, welcher sich in Abb. 4.30 ablesen lässt, ist die Lage der signifikanten Terme, welche Aufschluss über die Richtung des durch sie wirkenden Effektes gibt. Beide rot markierten Punkte befinden sich rechts der eingezeichneten Linie und weisen damit einen positiven Effekt auf. Das bedeutet, dass eine hohe Faktoreinstellung des Termes A sowie auch des Termes B zu einem höheren Wert der Antwortvariable führt.

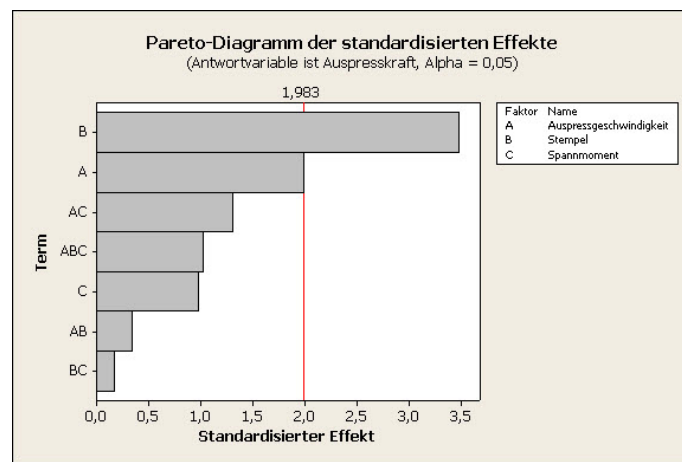


Abbildung 4.29: Zweiter Versuchsplan Erste Versuchsreihe Pareto

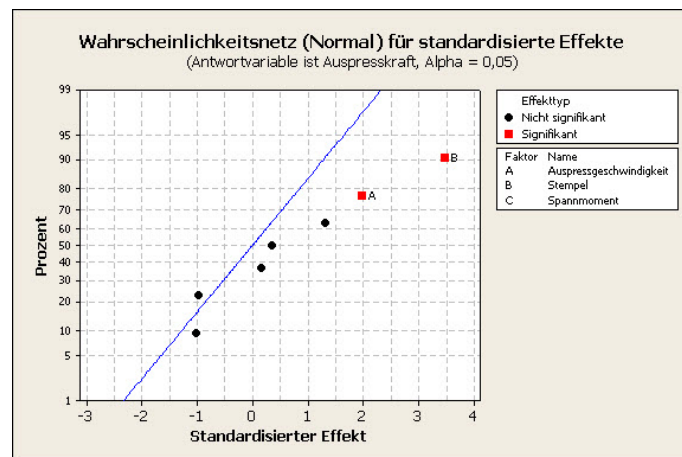


Abbildung 4.30: Zweiter Versuchsplan Erste Versuchsreihe Wahrscheinlichkeitsnetz für Effekte

In der nachfolgend aufgeführten Darstellung der Haupteffekte lässt sich erkennen, dass der Einfluss der Auspressgeschwindigkeit und des Stempels am größten ist und des Spannmomentes am geringsten. Dabei fällt der Effekt des Stempels noch größer aus als der der Auspressgeschwindigkeit.

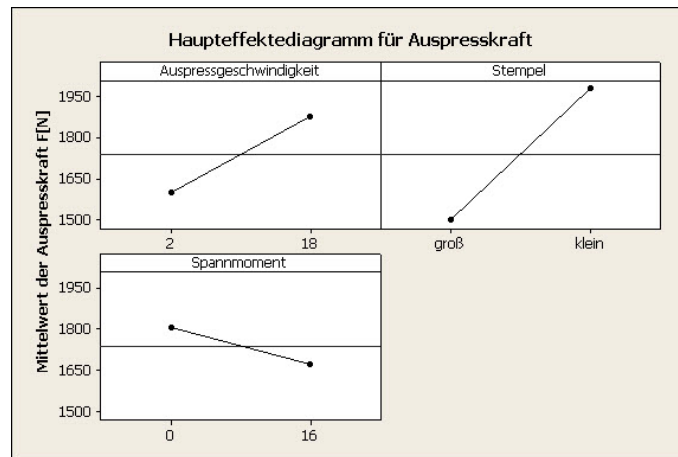


Abbildung 4.31: Zweiter Versuchsplan Erste Versuchsreihe Haupteffektdiagramm

Durch die anschließend erstellte Boxplot-Grafik lassen sich 2 Ausreißer erkennen. Weiterhin ist sichtbar, dass die Kombination 2/groß/0 in Hinsicht auf die Streuung am günstigsten ist, jedoch die Kombination 18/klein/0 in Betracht der erreichten Kräfte und auch des erreichten Kraftmittelwertes am günstigsten erscheint.

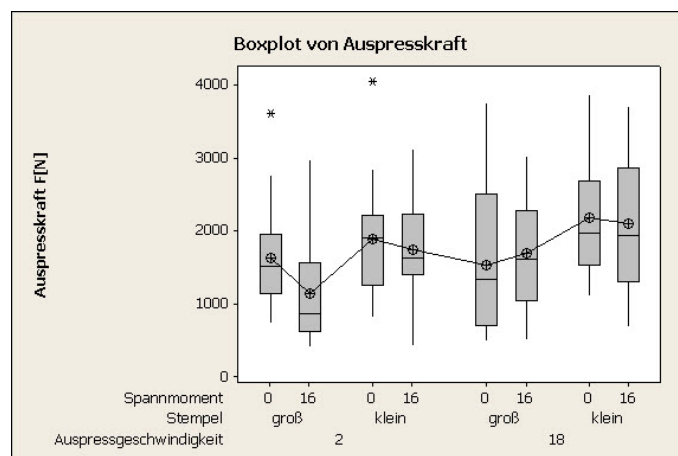


Abbildung 4.32: Zweiter Versuchsplan Erste Versuchsreihe Boxplot

4.4.2 2. Durchlauf

Auswertung mittels Microsoft Excel:

Im 2. Durchlauf dieser Versuchsreihe ist in dem nachfolgend dargestellten Balkendiagramm eine Paar-Tendenz der LP 1 und 2 sowie 3 und 4 erkennbar. Dabei gestaltet sich diese Tendenz fallend, d.h. das LP 2 hat eine niedrigere mittlere Kraft als LP 1 und das LP 4 ebenfalls eine niedrigere mittlere Kraft als LP 3. Die LP 5 und 6 weisen die geringsten Kräfte auf. LP 7 und 8 liegen in ihren mittleren Kräften zwischen denen der LP 1/2 und 3/4. Damit ist, wenn man die bei LP 4 kleine aufgetretene Minimal-Kraft berücksichtigt, das LP 3 in seiner Kombination am günstigsten.

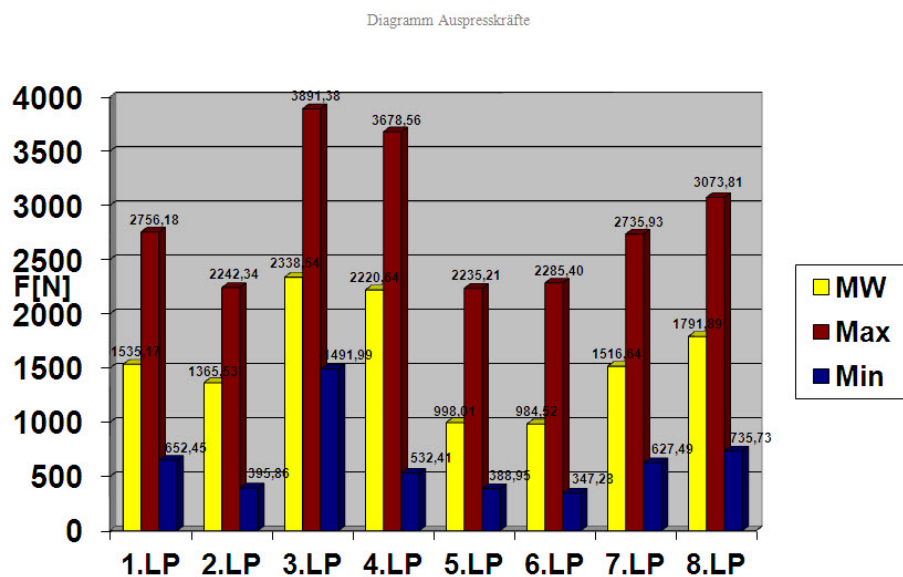


Abbildung 4.33: Diagramm über die Auspresskraft der zweiten Versuchsreihe - zweiter Durchlauf

Auswertung mittels Minitab 16:

Das erstellte Wahrscheinlichkeitsnetz des 2. Durchlaufes weist ebenfalls keine Gauß'sche Normalverteilung der Werte nach. Eine Histogramm-Grafik zu dieser Untersuchung stützte das vom Wahrscheinlichkeitsnetz resultierende Ergebnis. Es liegt auch hier eher eine logarithmische Normalverteilung der Werte vor.

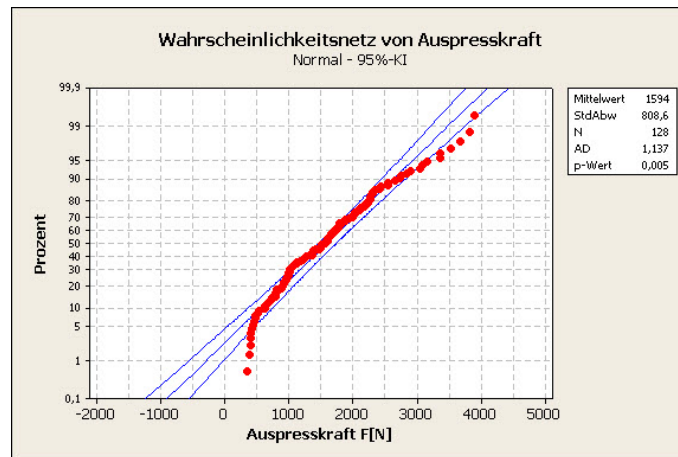


Abbildung 4.34: Zweiter Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Wahrscheinlichkeitsnetz

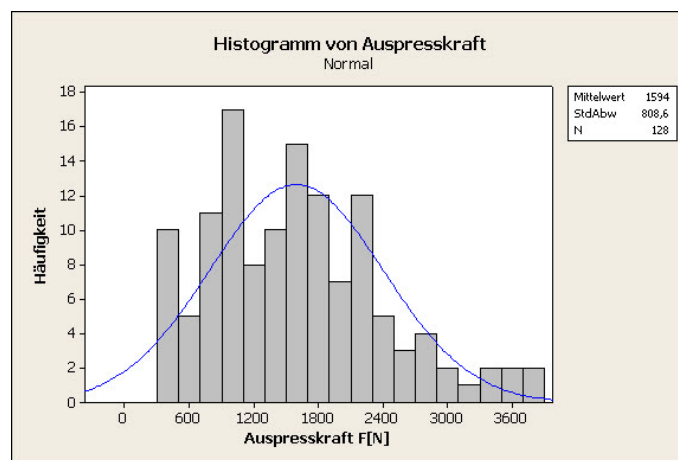


Abbildung 4.35: Zweiter Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Histogramm

Die Signifikanzprüfung mittels Minitab ergab, dass die Terme B und A in ihrem Effekt am signifikantesten sind⁶. Mit Hilfe eines Pareto-Diagrammes und eines Wahrscheinlichkeitsnetzes ließ sich dieser Sachverhalt grafisch darstellen. Die Terme B und A überschreiten die rote Markierung weit, und auch im Wahrscheinlichkeitsnetz sind diese beiden Terme als rot und signifikant markiert. Der dargestellte signifikante Effekt des Termes A befindet sich dabei links der in der Grafik eingezeichneten Linie und weist somit einen negativen Effekt auf. Der durch seine Signifikanz rot markierte Term B ist in seiner Lage rechts der Linie zu finden und weist damit den schon durch Anhang B.4 erkannten positiven Effekt des Termes nach.

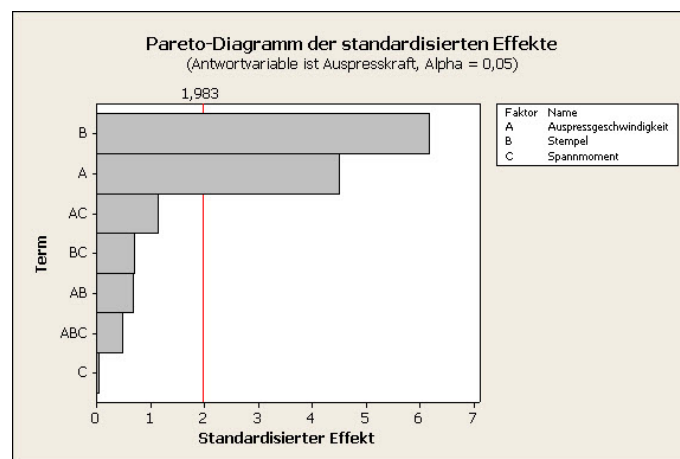


Abbildung 4.36: Zweiter Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Pareto

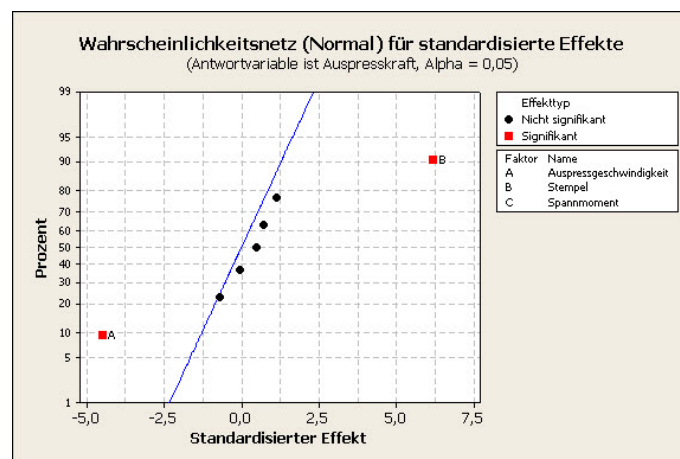


Abbildung 4.37: Zweiter Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Wahrscheinlichkeitsnetz für Effekte

⁶Vgl. Anhang B.4

Wenn man das nachfolgend erstellte Haupteffektdiagramm betrachtet, so fällt auf, dass der Stempel den größten Einfluss mit sich bringt, die Auspressgeschwindigkeit weniger Einfluss ausübt und das Drehmoment in diesem 2. Durchlauf scheinbar keinen Einfluss zeigt. Die Richtung des Effektes der Auspressgeschwindigkeit ist dabei im Vergleich des zum im 1. Durchlauf erstellten Haupteffektdiagrammes umgekehrt.

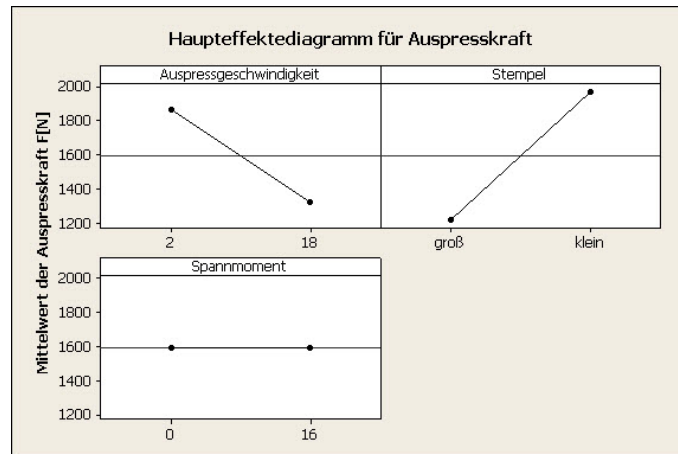


Abbildung 4.38: Zweiter Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Haupteffektdiagramm

Die danach erstellte Boxplot-Grafik lässt erkennen, dass die Kombination 18/klein/0 sowie 18/klein/16 in Hinsicht auf Streuung die kleinsten Boxen aufweisen und damit am günstigsten scheinen, jedoch wenn man die mittlere Kraft einer Kombination betrachtet, die Box der Faktorkombination 2/klein/0 am besten erscheint.

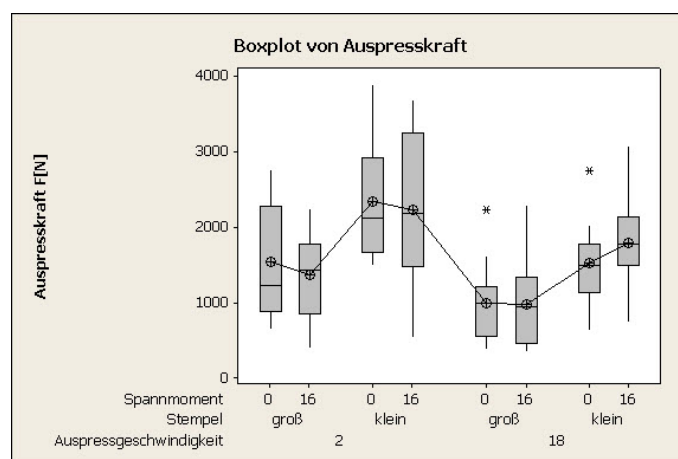


Abbildung 4.39: Zweiter Versuchsplan Zweite Versuchsreihe Boxplot

4.4.3 Vergleich der Durchläufe 1 und 2

Wenn man nun beide Durchläufe miteinander vergleicht, so existieren auch in diesem 2. Versuchsplan Gemeinsamkeiten und Unterschiede. Die Gemeinsamkeiten beziehen sich auf folgende Aspekte:

- die Balkendiagramme beider Durchläufe zeigen gleiche Tendenzen, dabei ist die Paar-Tendenz des 1. und 2. sowie 3. und 4. LP auffallend
- die steigende Tendenz der mittleren Kraft in beiden Balkendiagrammen lässt sich für die LP 5 bis 8 erkennen
- es trat eine große Streuung der Auspresskräfte jeweils im 1. sowie 2. Durchlauf auf
- die durch die Summe aller Werte gebildete Linie im Wahrscheinlichkeitsnetz ist in beiden Durchläufen auffallend gleich und bildet keine Gerade - als Folge dessen ist eine Gauß'sche Normalverteilung ausgeschlossen
- beide Histogramme zeigen Kurvenverläufe, die keiner Gauß'schen Glockenkurve folgen - vielmehr einer Linie logarithmisch normalverteilter Werte
- die Standardabweichung ist annähernd gleich (im 1. Durchlauf 842,4N - im 2. Durchlauf 808,6N)
- die Terme B und A sind signifikant (der Term B in beiden Läufen jeweils höher signifikant als A)
- Faktor Stempel zeigt größten Effekt
- Faktor Spannmoment kann ohne Effekt angesehen werden, da im 1. Durchlauf dieser sehr gering und im 2. Durchlauf ganz ohne Effekt aufgetreten ist
- ähnlicher Verlauf der mittleren Kraftwerte in der erstellten Boxplot-Grafik, dabei auffallend die Kombination 2/groß/16 mit der in beiden Durchläufen kleinen mittleren Kraft

Unterschiede lassen sich in folgender Art und Weise erkennen:

- Haupteffekt der Auspressgeschwindigkeit folgt im 2. Durchlauf entgegengesetzter Tendenz
- die in der Boxplot-Grafik im 1. Durchlauf für die mittlere Kraft günstig angesehene Kombination 18/klein/0 ist im 2. Durchlauf nur in Bezug auf die existierende geringe Streuung günstig

Wie können nun auch hier solche Unterschiede entstehen?

Zunächst ist es von Bedeutung zu wissen, dass alle LP dieser Versuchsreihe innerhalb von 2 Tagen unter gleichen Bedingungen hergestellt worden sind und somit kein LP größeren Umwelteinflüssen ausgesetzt war. Stichwort ist hierbei eine eventuelle Aushärtung durch Lichteinfluss. Daher können auch hier die von der Auspressvorrichtung eingebrachten Streuungen ebenso wie die Position der Magnete in den Taschen einen Einfluss mit sich bringen. Weitere Umwelteinflüsse können jedoch auch hier wirken und bedürfen einer genaueren Analyse und Untersuchung.

4.5 Zusatzversuche

Zusätzlich zu den geplanten Versuchsreihen wurden weitere 4 LP vergossen. Diese Versuche verfolgten das Ziel der Untersuchung von Einflüssen der Oberflächenbeschaffenheit auf die Auspresseigenschaften der Magnete. Jedes der 4 LP besitzt unterschiedlich in ihrer Oberfläche bearbeitete Magnete. Dabei wurden folgende Änderungen vollzogen:

- 1 LP mit Magneten, welche mit bloßer Hand angefasst worden sind und damit eine durch Handschweiß und -feuchtigkeit verunreinigte OF besitzen.
- 1 LP mit Magneten, welche eine durch Schmiermittel verunreinigte OF aufweisen. Dabei wurde als Schmiermittel ein Öl gewählt, welches zum einen als Motoren- und Getriebeöl Anwendung findet, und zum anderen als Öl in Hydrauliksystemen verwendet werden kann. Die technische Bezeichnung lautet HD10W30 und zählt zu Hochleistungs-Kraftübertragungsölen⁷. Damit ist ein Öl verwendet worden, welches in der Serienfertigung als Maschinenöl durchaus verwendet werden kann und unter Umständen tatsächlich auf Magnete, während der Bestückung von LP, treffen und diese verunreinigen könnte.
- 1 LP mit Magneten, welche in ihrer OF durch Kratzer beschädigt worden sind. Die Ausrichtung der Kratzer erfolgte dabei in Längsrichtung des Magneten⁸.
- 1 LP mit Magneten, welche ebenfalls zerkratzt worden sind, jedoch die Ausrichtung dieser OF-beschädigung nicht längs sondern quer erfolgt ist⁹.

Durch die hohe Härte der Magnete konnten diese jedoch nicht so stark beschädigt werden, sodass lediglich von einer Beschädigung der OF-beschichtung auszugehen ist. Das Verkleben der Magnete erfolgte ebenfalls nach den Serienparametern der 2. Versuchsreihe¹⁰.

⁷Quelle: [13]

⁸Vgl. Abb. 4.40

⁹Vgl. Abb. 4.41

¹⁰Vgl. Tab. 4.1

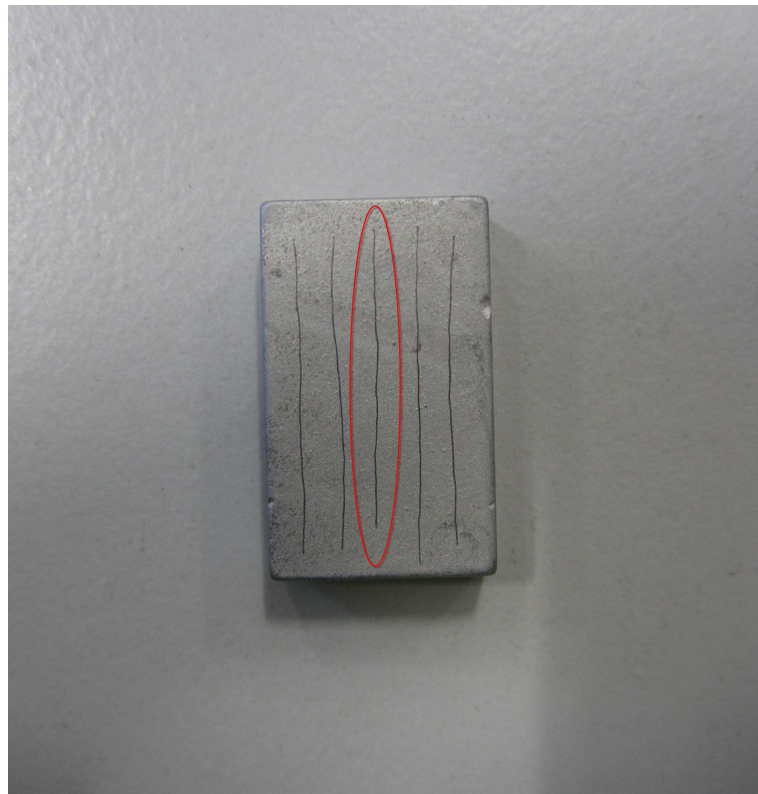


Abbildung 4.40: Magnet mit Längskratzer



Abbildung 4.41: Magnet mit Querkratzer

Folgendes Balkendiagramm ergab die Untersuchung der 4 LP des Zusatzversuches:

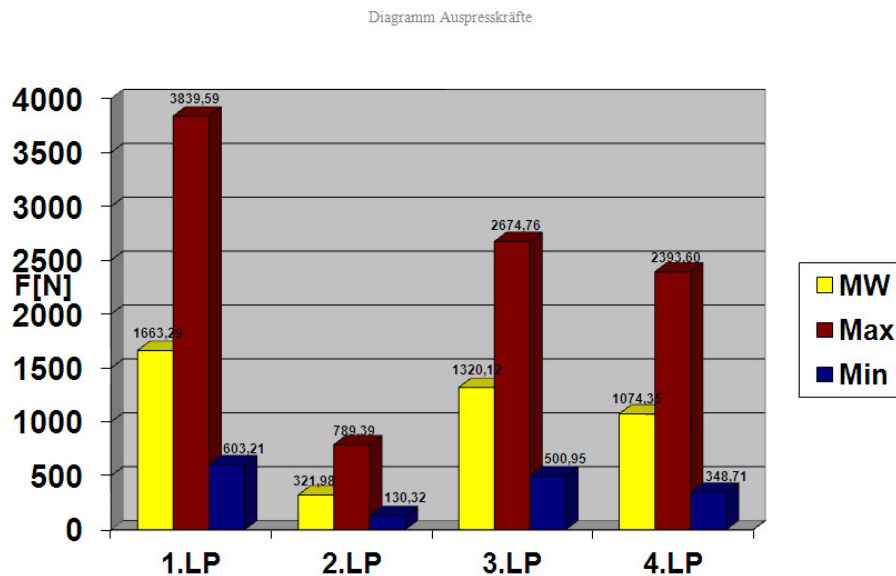


Abbildung 4.42: Diagramm Auspresskraft Zusatzversuche

Die Nummerierung gestaltete sich wie folgt:

- 1. LP: mit Hand angefasste Magnete
- 2. LP: Magnete mit Öl benetzt
- 3. LP: Magnete mit Längskratzer
- 4. LP: Magnete mit Querkratzer

Eindeutig erkennbar in ihren sehr niedrigen Kraftwerten ist das 2. LP mit den mit Öl benetzten Magneten. Das LP mit den mit bloßer Hand angefassten Magneten weist die größten Kräfte auf, LP 3 und 4 niedrigere. Dabei besitzt das LP mit Längskratzern eine höhere Kraft als jenes mit Querkratzern. Somit lässt sich ableiten, dass das Öl auf der Oberfläche von Magneten einen sehr großen Einfluss besitzt und die Haltekraft zwischen Harz und Magnet drastisch reduziert. Ebenfalls erkennbar ist die mögliche Reduzierung der Haltekraft bei zerkratzten Magneten, wobei nähere Untersuchungen folgen müssten, da man bei jeweils nur einem LP keine Aussage treffen kann, ob ein solcher Einfluss prinzipiell vorliegt, oder nur Streuung zu solch einem Ergebnis geführt hat. Das gleiche gilt für das LP mit den von Hand angefassten Magneten, eine Verallgemeinerung zu der Tendenz höherer Kräfte kann auch hier nicht getroffen werden.

Kapitel 5

Schlussfolgerung und Ausblick

In diesem Kapitel wird eine Schlussfolgerung über die gewonnenen Ergebnisse der Versuchsreihen aufgeführt. Ebenso wird ein Ausblick auf einen möglichen nächsten Versuchsplan gegeben und dessen Hintergrund erklärt.

5.1 Schlussfolgerung

Betrachtet man beide Versuchspläne getrennt voneinander, so lässt sich sagen, dass für den 1. Versuchsplan keine konkrete Aussage getroffen werden kann, welche Kombination von Faktoren am günstigsten erscheint. Wenn man die Balkendiagramme beider Durchläufe miteinander vergleicht, so kann man jedoch, wenn man einzig allein die mittlere Kraft ansieht, erkennen, dass die Kombination der LP 6 und 7 sehr gleichnahe Werte liefern und in Anbetracht dessen als günstigste Kombination anzusehen sind. Desweiteren ist der Einfluss der Vorwärmtemperatur am größten. Weshalb sich der Effekt der Harzmenge und des Drehmomentes im 2. Durchlauf umgekehrt hat, kann nicht exakt gesagt werden, es müssen weitere Untersuchungen hinsichtlich der im Abschnitt 4.3.3 genannten Störgrößen erfolgen. Dabei sollte zunächst jeder dieser Faktoren genau analysiert werden. Eine Suche nach weiteren möglichen Störgrößen ist dabei unerlässlich.

Als Ergebnis des 2. Versuchsplanes lässt sich festhalten, dass die Kombinationen von 2mm/min Auspressgeschwindigkeit, kleinem Stempel und 0Nm bzw. 16Nm am günstigsten erscheinen. Zwar ist die mittlere Kraft dieser Kombination im 1. Durchlauf kleiner als im 2. Durchlauf, jedoch fällt bei dieser die Streuung geringer aus (die Box in ihrer Höhe ist kleiner). Im Vergleich scheinen daher diese beiden Kombination am günstigsten. Betrachtet man die in diesen beiden Durchläufen jeweils erstellten Haupteffektdiagramme, so ist der Faktor der Auspressgeschwindigkeit in seinem Effekt umgekehrt. Ursachen hierfür müssen ebenfalls gesucht und analysiert werden. Dabei sind Störgrößen, welche im 1. Versuchsplan auftreten können, auch im 2. Versuchsplan relevant. Stichworte hierbei sind die Position der Magnete in den Taschen, die von dem Auspressvorgang eingebrachte Streuung oder das Aushärteverhalten des Harzes ebenso wie dessen Ausgangseigenschaften (z.Bsp. Viskositäten)

Die große Streuung der Auspresskräfte ist in beiden Versuchsplänen aufgetreten und somit noch einmal bestätigt worden.

Ein konkreter Vorschlag für eine Prüfanweisung kann somit nicht gegeben werden.

5.2 Ausblick

Als Ausblick auf weitere Erkenntnisse kann man zunächst das Problem der Magnetpositionierung in Betracht ziehen. Die Positionsmöglichkeiten der Magnete in den Taschen gestalten sich dabei wie folgt:

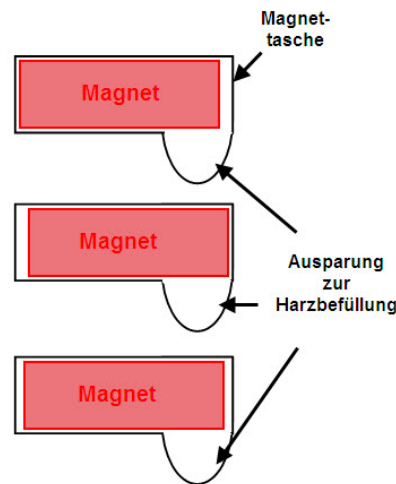


Abbildung 5.1: Mögliche Positionen des Magneten im LP

Das Harz hat damit 3 verschiedene Möglichkeiten um den Magneten herum zu fließen und ihn damit festzuhalten. Eine Analyse der ausgepressten Magnete ergab folgende Hinweise:

- an ausgepressten Magneten haftet kein Harz, einzig allein am Ort der Harzbefüllung ist ein wenig Kleber am Magneten haften geblieben¹
- einige Magnete weisen seitliche Schäden auf, diese rühren wahrscheinlich daher, dass der Magnet bei dem Auspressen am LP entlang geschliffen ist²
 - eine daraus resultierende Vermutung ist, dass diese schadhafte Stelle am Magneten durch zu wenig Harz zwischen Magnet und Tasche zustande gekommen ist (zu wenig Harz in Spalt geflossen) und sich damit an einer Stelle befindet, in der der Magnet zu weit rechts oder links positioniert gewesen ist
 - daraus ergibt sich, dass die aufgenommenen Kraft-Weg-Kurven dieser beschädigten Magnete verfälscht wurden

¹Vgl. Abb. 5.2

²Vgl. Abb. 5.2

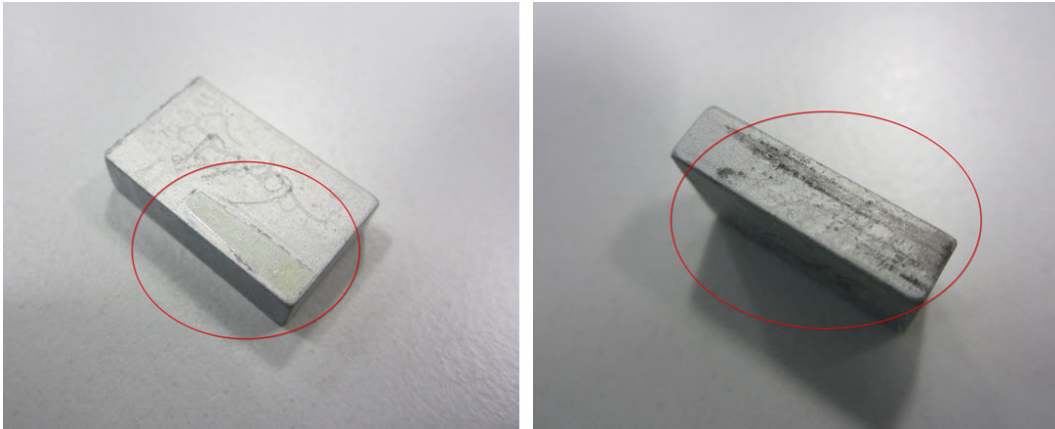


Abbildung 5.2: Magnet mit Restharz und Magnet mit Beschädigung

Somit bilden diese ersten Hinweise eine Grundlage für weitere Untersuchungen. Ein möglicher nächster Versuchsplan nach Vorbild des „vollständigen faktoriellen Versuchsplanes 1. Ordnung vom Typ 2ⁿ“ könnte wie folgt aussehen und erste Informationen über diese Störgrößen liefern:

Magnetposition		Temperatur Harz		Abkühltemperatur	
A	rechts	A	10°C	A	10°C
			20°C		20°C
B	links	B	30°C	B	30°C

Negativ veränderter Wert gegenüber Serienprozess

Positiv veränderter Wert gegenüber Serienprozess

Abbildung 5.3: Nächster möglicher Versuchsplan

- Faktor 1 - Magnetposition: Position der Magnete rechts und links als Grenzposition
- Faktor 2 - Harztemperatur: Veränderung der Viskosität des Harzes als Änderung der Ausgangseigenschaft
- Faktor 3 - Abkühltemperatur: Änderung der Umgebungstemperatur um Nachhärtphase bzw. Nachausgasung durch hohe Eigentemperatur nach Ofenentnahme zu verkürzen

Anhang A

DIN-Norm

A.1 DIN EN 10106 Elektroblech - Ausschnitt

Tabelle 1 — Magnetische und technologische Eigenschaften

Stahlsorte		Nenn- dicke mm	Ummagneti- sierungs- verlust bei 50 Hz und 1,5 T W/kg max.	Magnetische Polarisation ^a <i>I</i> min. im Wechselfeld bei einer magnetischen Feldstärke in A/m von			Anisotropie des Ummagneti- sierungs- verlustes bei 50 Hz und 1,5 T % max.	Stapel- faktor min.	Biege- zahl min.	Vereinbarte Werte der Dichte ^b kg/dm ³
				2 500	5 000	10 000				
Kurzname	Werkstoff- nummer									
M235-35A	1.0890	0,35	2,35	1,49	1,60	1,70	±17	0,95	2	7,60
M250-35A	1.0800		2,50	1,49	1,60	1,70	±17		2	7,60
M270-35A	1.0801		2,70	1,49	1,60	1,70	±17		2	7,65
M300-35A	1.0803		3,00	1,49	1,60	1,70	±17		3	7,65
M330-35A	1.0804		3,30	1,49	1,60	1,70	±17		3	7,65
M250-50A	1.0801		2,50	1,49	1,60	1,70	±17		2	7,60

Abbildung A.1: Ausschnitt aus DIN-Norm Elektroblech

Anhang B

Signifikanzprüfung Minitab

B.1 1. Versuchsplan 1. Durchlauf

Faktorielle Anpassung: Auspresskraft vs. Block; Vorwärmtemp; Harzmenge; ...

Geschätzte Effekte und Koeffizienten für Auspresskraft (kodierte Einheiten)

Term	Effekt	Koef	SE Koef	t	p
Konstante		1175,6	37,63	31,24	0,000
Block 1		-22,4	145,73	-0,15	0,878
Block 2		-171,2	145,73	-1,17	0,243
Block 3		4,0	145,73	0,03	0,978
Block 4		-172,5	145,73	-1,18	0,239
Block 5		-15,0	145,73	-0,10	0,918
Block 6		-144,4	145,73	-0,99	0,324
Block 7		27,4	145,73	0,19	0,851
Block 8		-65,4	145,73	-0,45	0,654
Block 9		-161,4	145,73	-1,11	0,270
Block 10		-11,4	145,73	-0,08	0,938
Block 11		-13,6	145,73	-0,09	0,926
Block 12		389,5	145,73	2,67	0,009
Block 13		130,5	145,73	0,90	0,373
Block 14		227,9	145,73	1,56	0,121
Block 15		93,4	145,73	0,64	0,523
Vorwärmtemperatur	108,8	54,4	37,63	1,45	0,151
Harzmenge	-139,1	-69,5	37,63	-1,85	0,067
Drehmoment	-62,3	-31,1	37,63	-0,83	0,410
Vorwärmtemperatur*Harzmenge	78,5	39,3	37,63	1,04	0,299
Vorwärmtemperatur*Drehmoment	50,7	25,3	37,63	0,67	0,502
Harzmenge*Drehmoment	-11,6	-5,8	37,63	-0,15	0,877
Vorwärmtemperatur*Harzmenge*Drehmoment	-171,1	-85,6	37,63	-2,27	0,025

S = 425,694 PRESS = 28276507
R-Qd = 21,29% R-Qd(prog) = 0,00% R-Qd(kor) = 4,79%

Varianzanalyse für Auspresskraft (kodierte Einheiten)

Quelle	DF	Seq SS	Kor SS	Kor MS
Blöcke	15	2803434	2803434	186896
Haupteffekte	3	1121672	1121672	373891
Vorwärmtemperatur	1	378705	378705	378705
Harzmenge	1	618916	618916	618916
Drehmoment	1	124051	124051	124051
2-Faktor-Wechselwirkungen	3	283780	283780	94593
Vorwärmtemperatur*Harzmenge	1	197246	197246	197246
Vorwärmtemperatur*Drehmoment	1	82192	82192	82192
Harzmenge*Drehmoment	1	4342	4342	4342
3-Faktor-Wechselwirkungen	1	936924	936924	936924
Vorwärmtemperatur*Harzmenge*Drehmoment	1	936924	936924	936924
Residuenfehler	105	19027618	19027618	181215
Gesamt	127	24173428		

Quelle	F	p
Blöcke	1,03	0,430
Haupteffekte	2,06	0,110
Vorwärmtemperatur	2,09	0,151
Harzmenge	3,42	0,067
Drehmoment	0,68	0,410
2-Faktor-Wechselwirkungen	0,52	0,668
Vorwärmtemperatur*Harzmenge	1,09	0,299
Vorwärmtemperatur*Drehmoment	0,45	0,502
Harzmenge*Drehmoment	0,02	0,877
3-Faktor-Wechselwirkungen	5,17	0,025
Vorwärmtemperatur*Harzmenge*Drehmoment	5,17	0,025
Residuenfehler		
Gesamt		

Ungewöhnliche Beobachtungen für Auspresskraft

Beob	StdRfolge	Auspresskraft	Anpassung	SE Anpassung	Residuum	Std. Resid.
15	15	1974,90	1003,52	180,45	971,39	2,52R
77	74	1923,81	1024,22	180,45	899,60	2,33R
96	91	3027,83	1735,31	180,45	1292,53	3,35R
99	102	2279,35	1476,31	180,45	803,05	2,08R
112	107	2965,17	1573,73	180,45	1391,45	3,61R
114	116	2369,09	1390,24	180,45	978,85	2,54R

R kennzeichnet eine Beobachtung mit einem großen standardisierten Residuum.

Geschätzte Koeffizienten für Auspresskraft unter Verwendung von Daten in nicht kodierten Einheiten

Term	Koef
Konstante	5691,82
Block 1	-22,415
Block 2	-171,160
Block 3	3,973
Block 4	-172,458
Block 5	-15,047
Block 6	-144,407
Block 7	27,416
Block 8	-65,434
Block 9	-161,446
Block 10	-11,445
Block 11	-13,632
Block 12	389,453
Block 13	130,457
Block 14	227,873
Block 15	93,363
Vorwärmtemperatur	-52,8431
Harzmenge	-15996,2
Drehmoment	-310,807
Vorwärmtemperatur*Harzmenge	192,667
Vorwärmtemperatur*Drehmoment	3,83967
Harzmenge*Drehmoment	1046,58
Vorwärmtemperatur*Harzmenge* Drehmoment	-13,4015

B.2 1. Versuchsplan 2. Durchlauf

Faktorielle Anpassung: Auspresskraft vs. Block; Vorwärmtemp; Harzmenge; ...

Geschätzte Effekte und Koeffizienten für Auspresskraft (kodierte Einheiten)

Term	Effekt	Koef	SE Koef	t	p
Konstante		1327,0	50,70	26,17	0,000
Block 1		-286,5	196,37	-1,46	0,148
Block 2		51,9	196,37	0,26	0,792
Block 3		-275,9	196,37	-1,41	0,163
Block 4		43,6	196,37	0,22	0,825
Block 5		1,0	196,37	0,01	0,996
Block 6		-42,1	196,37	-0,21	0,831
Block 7		-81,8	196,37	-0,42	0,678
Block 8		-119,2	196,37	-0,61	0,545
Block 9		271,0	196,37	1,38	0,171
Block 10		-257,5	196,37	-1,31	0,193
Block 11		409,8	196,37	2,09	0,039
Block 12		-173,9	196,37	-0,89	0,378
Block 13		-1,1	196,37	-0,01	0,995
Block 14		9,6	196,37	0,05	0,961
Block 15		144,2	196,37	0,73	0,465
Vorwärmtemperatur	139,6	69,8	50,70	1,38	0,171
Harzmenge	40,4	20,2	50,70	0,40	0,691
Drehmoment	60,4	30,2	50,70	0,60	0,552
Vorwärmtemperatur*Harzmenge	-37,9	-18,9	50,70	-0,37	0,710
Vorwärmtemperatur*Drehmoment	71,4	35,7	50,70	0,70	0,483
Harzmenge*Drehmoment	-26,5	-13,2	50,70	-0,26	0,794
Vorwärmtemperatur*Harzmenge* Drehmoment	82,3	41,1	50,70	0,81	0,419

S = 573,645 PRESS = 51347240
R-Qd = 15,52% R-Qd(prog) = 0,00% R-Qd(kor) = 0,00%

Varianzanalyse für Auspresskraft (kodierte Einheiten)

Quelle	DF	Seq SS	Kor SS	Kor MS
Blöcke	15	5108115	5108115	340541
Haupteffekte	3	793026	793026	264342
Vorwärmtemperatur	1	623934	623934	623934
Harzmenge	1	52188	52188	52188
Drehmoment	1	116904	116904	116904
2-Faktor-Wechselwirkungen	3	231593	231593	77198
Vorwärmtemperatur*Harzmenge	1	45910	45910	45910
Vorwärmtemperatur*Drehmoment	1	163242	163242	163242
Harzmenge*Drehmoment	1	22442	22442	22442
3-Faktor-Wechselwirkungen	1	216713	216713	216713
Vorwärmtemperatur*Harzmenge*Drehmoment	1	216713	216713	216713
Residuenfehler	105	34552205	34552205	329069
Gesamt	127	40901651		

Quelle	F	p
Blöcke	1,03	0,426
Haupteffekte	0,80	0,495
Vorwärmtemperatur	1,90	0,171
Harzmenge	0,16	0,691
Drehmoment	0,36	0,552
2-Faktor-Wechselwirkungen	0,23	0,872
Vorwärmtemperatur*Harzmenge	0,14	0,710
Vorwärmtemperatur*Drehmoment	0,50	0,483
Harzmenge*Drehmoment	0,07	0,794
3-Faktor-Wechselwirkungen	0,66	0,419
Vorwärmtemperatur*Harzmenge*Drehmoment	0,66	0,419
Residuenfehler		
Gesamt		

Ungewöhnliche Beobachtungen für Auspresskraft

Beob	StdRfolge	Auspresskraft	Anpassung	SE Anpassung	Residuum	Std. Resid.
10	12	2491,82	1356,06	243,17	1135,75	2,19R
15	15	2698,94	1288,26	243,17	1410,67	2,72R
70	72	3777,30	1762,82	243,17	2014,47	3,88R
82	84	2834,01	1713,98	243,17	1120,03	2,16R
87	87	430,07	1646,18	243,17	-1216,11	-2,34R
88	83	3756,56	1765,94	243,17	1990,62	3,83R
128	123	619,52	1663,17	243,17	-1043,65	-2,01R

R kennzeichnet eine Beobachtung mit einem großen standardisierten Residuum.

Geschätzte Koeffizienten für Auspresskraft unter Verwendung von Daten in nicht kodierten Einheiten

Term	Koef
Konstante	-788,38
Block 1	-286,521
Block 2	51,878
Block 3	-275,918
Block 4	43,640
Block 5	0,994
Block 6	-42,087
Block 7	-81,841
Block 8	-119,176
Block 9	270,961
Block 10	-257,468
Block 11	409,796
Block 12	-173,887
Block 13	-1,123
Block 14	9,563
Block 15	144,165
Vorwärmtemperatur	21,4365
Harzmenge	8435,77
Drehmoment	127,519
Vorwärmtemperatur*Harzmenge	-92,689
Vorwärmtemperatur*Drehmoment	-1,27642
Harzmenge*Drehmoment	-573,701
Vorwärmtemperatur*Harzmenge* Drehmoment	6,44532

B.3 2. Versuchsplan 1. Durchlauf

Faktorielle Anpassung: Auspresskraft vs. Block; Auspressgesch; Stempel; ...

Geschätzte Effekte und Koeffizienten für Auspresskraft (kodierte Einheiten)

Term	Effekt	Koef	SE Koef	t	p
Konstante		1738,2	69,14	25,14	0,000
Block 1		518,3	267,77	1,94	0,056
Block 2		-183,2	267,77	-0,68	0,495
Block 3		-327,5	267,77	-1,22	0,224
Block 4		132,9	267,77	0,50	0,621
Block 5		-267,9	267,77	-1,00	0,319
Block 6		-339,4	267,77	-1,27	0,208
Block 7		-423,4	267,77	-1,58	0,117
Block 8		-495,8	267,77	-1,85	0,067
Block 9		-135,9	267,77	-0,51	0,613
Block 10		-150,9	267,77	-0,56	0,574
Block 11		324,8	267,77	1,21	0,228
Block 12		560,0	267,77	2,09	0,039
Block 13		286,0	267,77	1,07	0,288
Block 14		14,0	267,77	0,05	0,958
Block 15		335,7	267,77	1,25	0,213
Auspressgeschwindigkeit	274,6	137,3	69,14	1,99	0,050
Stempel	480,2	240,1	69,14	3,47	0,001
Spannmoment	-135,0	-67,5	69,14	-0,98	0,331
Auspressgeschwindigkeit*Stempel	47,2	23,6	69,14	0,34	0,734
Auspressgeschwindigkeit*Spannmoment	180,3	90,1	69,14	1,30	0,195
Stempel*Spannmoment	23,0	11,5	69,14	0,17	0,868
Auspressgeschwindigkeit*Stempel*Spannmoment	-141,1	-70,5	69,14	-1,02	0,310

S = 782,206 PRESS = 95471347
R-Qd = 28,72% R-Qd(prog) = 0,00% R-Qd(kor) = 13,78%

Varianzanalyse für Auspresskraft (kodierte Einheiten)

Quelle	DF	Seq SS	Kor SS	Kor MS
Blöcke	15	13738928	13738928	915929
Haupteffekte	3	10375298	10375298	3458433
Auspressgeschwindigkeit	1	2413692	2413692	2413692
Stempel	1	7378006	7378006	7378006
Spannmoment	1	583601	583601	583601
2-Faktor-Wechselwirkungen	3	1128411	1128411	376137
Auspressgeschwindigkeit*Stempel	1	71265	71265	71265
Auspressgeschwindigkeit*Spannmoment	1	1040237	1040237	1040237
Stempel*Spannmoment	1	16909	16909	16909
3-Faktor-Wechselwirkungen	1	636953	636953	636953
Auspressgeschwindigkeit*Stempel*Spannmoment	1	636953	636953	636953
Residuenfehler	105	64243872	64243872	611846
Gesamt	127	90123463		

Quelle	F	p
Blöcke	1,50	0,120
Haupteffekte	5,65	0,001
Auspressgeschwindigkeit	3,94	0,050
Stempel	12,06	0,001
Spannmoment	0,95	0,331
2-Faktor-Wechselwirkungen	0,61	0,607
Auspressgeschwindigkeit*Stempel	0,12	0,734
Auspressgeschwindigkeit*Spannmoment	1,70	0,195
Stempel*Spannmoment	0,03	0,868
3-Faktor-Wechselwirkungen	1,04	0,310
Auspressgeschwindigkeit*Stempel*Spannmoment	1,04	0,310
Residuenfehler		
Gesamt		

Ungewöhnliche Beobachtungen für Auspresskraft

Beob	StdRfolge	Auspresskraft	Anpassung	SE Anpassung	Residuum	Std. Resid.
1	1	3614,60	2142,38	331,57	1472,22	2,08R
13	10	3757,19	1346,94	331,57	2410,25	3,40R
47	47	3130,64	1402,27	331,57	1728,37	2,44R
84	85	2974,91	1469,43	331,57	1505,47	2,13R
90	92	1104,35	2735,63	331,57	-1631,29	-2,30R
96	91	4042,12	2453,01	331,57	1589,11	2,24R
126	128	3705,45	2254,93	331,57	1450,52	2,05R

R kennzeichnet eine Beobachtung mit einem großen standardisierten Residuum.

Geschätzte Koeffizienten für Auspresskraft unter Verwendung von Daten in nicht kodierten Einheiten

Term	Koef
Konstante	1746,72
Block 1	518,326
Block 2	-183,189
Block 3	-327,460
Block 4	132,855
Block 5	-267,942
Block 6	-339,417
Block 7	-423,381
Block 8	-495,758
Block 9	-135,911
Block 10	-150,895
Block 11	324,790
Block 12	560,048
Block 13	286,000
Block 14	14,031
Block 15	335,715
Auspressgeschwindigkeit	5,8965
Stempel	110,919
Spannmoment	-22,5262
Auspressgeschwindigkeit*Stempel	11,7672
Auspressgeschwindigkeit*Spannmoment	1,40858
Stempel*Spannmoment	12,4589
Auspressgeschwindigkeit*Stempel* Spannmoment	-1,10222

B.4 2. Versuchsplan 2. Durchlauf

Faktorielle Anpassung: Auspresskraft vs. Block; Auspressgesch; Stempel; ...

Geschätzte Effekte und Koeffizienten für Auspresskraft (kodierte Einheiten)

Term	Effekt	Koef	SE Koef	t	p
Konstante		1593,9	60,29	26,44	0,000
Block 1		1,9	233,51	0,01	0,994
Block 2		-91,1	233,51	-0,39	0,697
Block 3		-335,7	233,51	-1,44	0,154
Block 4		-160,3	233,51	-0,69	0,494
Block 5		-11,1	233,51	-0,05	0,962
Block 6		234,4	233,51	1,00	0,318
Block 7		62,6	233,51	0,27	0,789
Block 8		333,2	233,51	1,43	0,157
Block 9		-196,0	233,51	-0,84	0,403
Block 10		-397,4	233,51	-1,70	0,092
Block 11		224,6	233,51	0,96	0,338
Block 12		-121,5	233,51	-0,52	0,604
Block 13		270,8	233,51	1,16	0,249
Block 14		253,8	233,51	1,09	0,280
Block 15		-83,6	233,51	-0,36	0,721
Auspressgeschwindigkeit	-542,2	-271,1	60,29	-4,50	0,000
Stempel	746,1	373,1	60,29	6,19	0,000
Spannmoment	-6,4	-3,2	60,29	-0,05	0,957
Auspressgeschwindigkeit*Stempel	-83,1	-41,6	60,29	-0,69	0,492
Auspressgeschwindigkeit*Spannmoment	137,3	68,7	60,29	1,14	0,257
Stempel*Spannmoment	85,1	42,6	60,29	0,71	0,482
Auspressgeschwindigkeit*Stempel*Spannmoment	59,3	29,6	60,29	0,49	0,624

S = 682,131 PRESS = 72605019
R-Qd = 41,16% R-Qd(prog) = 12,56% R-Qd(kor) = 28,83%

Varianzanalyse für Auspresskraft (kodierte Einheiten)

Quelle	DF	Seq SS	Kor SS
Blöcke	15	5785980	5785980
Haupteffekte	3	27223132	27223132
Auspressgeschwindigkeit	1	9407492	9407492
Stempel	1	17814311	17814311
Spannmoment	1	1329	1329
2-Faktor-Wechselwirkungen	3	1056376	1056376
Auspressgeschwindigkeit*Stempel	1	221084	221084
Auspressgeschwindigkeit*Spannmoment	1	603458	603458
Stempel*Spannmoment	1	231834	231834
3-Faktor-Wechselwirkungen	1	112345	112345
Auspressgeschwindigkeit*Stempel*Spannmoment	1	112345	112345
Residuenfehler	105	48856832	48856832
Gesamt	127	83034664	

Quelle	Kor MS	F	p
Blöcke	385732	0,83	0,644
Haupteffekte	9074377	19,50	0,000
Auspressgeschwindigkeit	9407492	20,22	0,000
Stempel	17814311	38,29	0,000
Spannmoment	1329	0,00	0,957
2-Faktor-Wechselwirkungen	352125	0,76	0,521
Auspressgeschwindigkeit*Stempel	221084	0,48	0,492
Auspressgeschwindigkeit*Spannmoment	603458	1,30	0,257
Stempel*Spannmoment	231834	0,50	0,482
3-Faktor-Wechselwirkungen	112345	0,24	0,624
Auspressgeschwindigkeit*Stempel*Spannmoment	112345	0,24	0,624
Residuenfehler	465303		
Gesamt			

Ungewöhnliche Beobachtungen für Auspresskraft

Beob	StdRfolge	Auspresskraft	Anpassung	SE Anpassung	Residuum	Std. Resid.
6	8	3073,82	1793,77	289,15	1280,05	2,07R
31	31	3678,56	2060,34	289,15	1618,23	2,62R
67	70	2285,41	788,54	289,15	1496,86	2,42R
79	79	532,41	1823,23	289,15	-1290,82	-2,09R

R kennzeichnet eine Beobachtung mit einem großen standardisierten Residuum.

Geschätzte Koeffizienten für Auspresskraft unter Verwendung von Daten in nicht kodierten Einheiten

Term	Koef
Konstante	2021,80
Block 1	1,875
Block 2	-91,086
Block 3	-335,682
Block 4	-160,307
Block 5	-11,116
Block 6	234,401
Block 7	62,642
Block 8	333,248
Block 9	-195,981
Block 10	-397,413
Block 11	224,602
Block 12	-121,465
Block 13	270,773
Block 14	253,840
Block 15	-83,606
Auspressgeschwindigkeit	-42,4705
Stempel	419,485
Spannmoment	-11,1313
Auspressgeschwindigkeit*Stempel	-8,8982
Auspressgeschwindigkeit*Spannmoment	1,07285
Stempel*Spannmoment	0,6907
Auspressgeschwindigkeit*Stempel* Spannmoment	0,462905

Anhang C

Minitab-Arbeitsblätter

C.1 Vorversuch

Std-R- folge	Durchlauf- reihenfolge	Zentral- punkt	Blöcke	Vorwärme- temperatur	Harzmenge	Drehmoment	Auspresskraft
1	1	1	1	45	0,1	10	1627,444702
2	2	1	1	90	0,1	10	963,3505249
3	3	1	1	45	0,2	10	1495,272461
4	4	1	1	90	0,2	10	670,9077759
5	5	1	1	45	0,1	16	1479,747925
6	6	1	1	90	0,1	16	1027,097534
7	7	1	1	45	0,2	16	1065,514404
8	8	1	1	90	0,2	16	622,8721313
9	9	1	1	45	0,1	10	1043,137939
10	10	1	1	90	0,1	10	398,6715088
11	11	1	1	45	0,2	10	1773,644531
12	12	1	1	90	0,2	10	838,4619141
13	13	1	1	45	0,1	16	736,9815674
14	14	1	1	90	0,1	16	1184,976929
15	15	1	1	45	0,2	16	624,3301392
16	16	1	1	90	0,2	16	937,3238525
17	17	1	1	45	0,1	10	1627,143433
18	18	1	1	90	0,1	10	1447,404297
19	19	1	1	45	0,2	10	497,9844055
20	20	1	1	90	0,2	10	471,140686
21	21	1	1	45	0,1	16	989,1686401
22	22	1	1	90	0,1	16	397,1118774
23	23	1	1	45	0,2	16	1110,629517
24	24	1	1	90	0,2	16	643,7091675
25	25	1	1	45	0,1	10	1169,419556
26	26	1	1	90	0,1	10	792,449707
27	27	1	1	45	0,2	10	826,1689453
28	28	1	1	90	0,2	10	1077,894653
29	29	1	1	45	0,1	16	440,8305969
30	30	1	1	90	0,1	16	1051,192871
31	31	1	1	45	0,2	16	894,7009888
32	32	1	1	90	0,2	16	769,3311157
33	33	1	1	45	0,1	10	1148,630981
34	34	1	1	90	0,1	10	943,7238159
35	35	1	1	45	0,2	10	568,8239746
36	36	1	1	90	0,2	10	955,6240845
37	37	1	1	45	0,1	16	693,6815796
38	38	1	1	90	0,1	16	676,7166748
39	39	1	1	45	0,2	16	1701,903564
40	40	1	1	90	0,2	16	938,9780273
41	41	1	1	45	0,1	10	816,9907837
42	42	1	1	90	0,1	10	602,6879883
43	43	1	1	45	0,2	10	953,7759399
44	44	1	1	90	0,2	10	521,0613403
45	45	1	1	45	0,1	16	1656,960083
46	46	1	1	90	0,1	16	765,2092896
47	47	1	1	45	0,2	16	602,3884888
48	48	1	1	90	0,2	16	737,9304199
49	49	1	1	45	0,1	10	642,5732422
50	50	1	1	90	0,1	10	828,2270508
51	51	1	1	45	0,2	10	1174,572388
52	52	1	1	90	0,2	10	848,2196655
53	53	1	1	45	0,1	16	598,848938

54	54	1	1	90	0,1	16	491,3141174
55	55	1	1	45	0,2	16	2084,639648
56	56	1	1	90	0,2	16	804,597168
57	57	1	1	45	0,1	10	1058,957153
58	58	1	1	90	0,1	10	1651,575928
59	59	1	1	45	0,2	10	491,4305725
60	60	1	1	90	0,2	10	2056,529541
61	61	1	1	45	0,1	16	1329,63855
62	62	1	1	90	0,1	16	2011,454956
63	63	1	1	45	0,2	16	613,7227173
64	64	1	1	90	0,2	16	415,3270874
65	65	1	1	45	0,1	10	1104,68396
66	66	1	1	90	0,1	10	724,3375854
67	67	1	1	45	0,2	10	1074,362305
68	68	1	1	90	0,2	10	1139,141968
69	69	1	1	45	0,1	16	784,8657227
70	70	1	1	90	0,1	16	1371,410034
71	71	1	1	45	0,2	16	716,5288086
72	72	1	1	90	0,2	16	696,6647339
73	73	1	1	45	0,1	10	922,4743042
74	74	1	1	90	0,1	10	1221,921753
75	75	1	1	45	0,2	10	1245,710938
76	76	1	1	90	0,2	10	369,5675049
77	77	1	1	45	0,1	16	1930,590576
78	78	1	1	90	0,1	16	516,6634521
79	79	1	1	45	0,2	16	1858,423828
80	80	1	1	90	0,2	16	591,1278076

C.2 1. Versuchsreihe 1. Durchlauf

Std-R- folge	Durchlauf- reihenfolge	Zentral punkt	Blöcke	Vorwärme- temperatur	Harzmenge	Drehmoment	Auspresskraft
1	1	1	1	52	0,188	10	1328,464844
4	2	1	1	108	0,34	10	1525,908203
6	3	1	1	108	0,188	16	842,1661987
5	4	1	1	52	0,188	16	1044,470337
2	5	1	1	108	0,188	10	1275,186035
8	6	1	1	108	0,34	16	971,6427002
7	7	1	1	52	0,34	16	1165,9646
3	8	1	1	52	0,34	10	1071,591553
9	9	1	2	108	0,34	16	745,3768311
12	10	1	2	52	0,188	16	1504,138062
14	11	1	2	52	0,34	10	766,3870239
13	12	1	2	108	0,34	10	917,6380005
10	13	1	2	52	0,34	16	512,4746094
16	14	1	2	52	0,188	10	698,4824829
15	15	1	2	108	0,188	10	1974,900391
11	16	1	2	108	0,188	16	916,0384521
17	17	1	3	52	0,188	10	1846,229614
20	18	1	3	108	0,34	10	1054,096924
22	19	1	3	108	0,188	16	971,3479614
21	20	1	3	52	0,188	16	1443,221313
18	21	1	3	108	0,188	10	1371,472534
24	22	1	3	108	0,34	16	1164,366211
23	23	1	3	52	0,34	16	702,0978394
19	24	1	3	52	0,34	10	883,6687012
25	25	1	4	108	0,34	16	874,1947021
28	26	1	4	52	0,188	16	1473,878174
30	27	1	4	52	0,34	10	644,0422363
29	28	1	4	108	0,34	10	1000,501221
26	29	1	4	52	0,34	16	1607,919434
32	30	1	4	52	0,188	10	1232,608032
31	31	1	4	108	0,188	10	634,4619751
27	32	1	4	108	0,188	16	557,4402466
33	33	1	5	52	0,188	10	1260,099487
36	34	1	5	108	0,34	10	1223,397583
38	35	1	5	108	0,188	16	1097,197021
37	36	1	5	52	0,188	16	611,0532227
34	37	1	5	108	0,188	10	1362,638672
40	38	1	5	108	0,34	16	1477,346313
39	39	1	5	52	0,34	16	911,9626465
35	40	1	5	52	0,34	10	1340,6427
41	41	1	6	108	0,34	16	980,1021118
44	42	1	6	52	0,188	16	710,4040527
46	43	1	6	52	0,34	10	1094,721802
45	44	1	6	108	0,34	10	1341,488037
42	45	1	6	52	0,34	16	1367,714478
48	46	1	6	52	0,188	10	988,9954834
47	47	1	6	108	0,188	10	865,9122314
43	48	1	6	108	0,188	16	900,1192627
49	49	1	7	52	0,188	10	1938,972046
52	50	1	7	108	0,34	10	1235,364136
54	51	1	7	108	0,188	16	1492,093262
53	52	1	7	52	0,188	16	1332,031128
50	53	1	7	108	0,188	10	645,4743652

56	54	1	7	108	0,34	16	1182,360474
55	55	1	7	52	0,34	16	892,6296387
51	56	1	7	52	0,34	10	905,1188965
57	57	1	8	108	0,34	16	980,3829956
60	58	1	8	52	0,188	16	907,8147583
62	59	1	8	52	0,34	10	1038,626709
61	60	1	8	108	0,34	10	1570,602905
58	61	1	8	52	0,34	16	1054,526123
64	62	1	8	52	0,188	10	665,9196777
63	63	1	8	108	0,188	10	898,5632935
59	64	1	8	108	0,188	16	1764,80481
65	65	1	9	52	0,188	10	1210,061401
68	66	1	9	108	0,34	10	885,6400146
70	67	1	9	108	0,188	16	611,7434082
69	68	1	9	52	0,188	16	1048,027466
66	69	1	9	108	0,188	10	876,4265137
72	70	1	9	108	0,34	16	1051,92334
71	71	1	9	52	0,34	16	1324,889893
67	72	1	9	52	0,34	10	1104,430176
73	73	1	10	108	0,34	16	988,5402832
76	74	1	10	52	0,188	16	1175,509033
78	75	1	10	52	0,34	10	868,1213379
77	76	1	10	108	0,34	10	1132,148804
74	77	1	10	52	0,34	16	1923,814453
80	78	1	10	52	0,188	10	739,9945679
79	79	1	10	108	0,188	10	1139,9198
75	80	1	10	108	0,188	16	1345,101563
81	81	1	11	52	0,188	10	1832,780151
84	82	1	11	108	0,34	10	997,1751099
86	83	1	11	108	0,188	16	1179,76709
85	84	1	11	52	0,188	16	1104,271118
82	85	1	11	108	0,188	10	1773,444092
88	86	1	11	108	0,34	16	838,227417
87	87	1	11	52	0,34	16	981,0301514
83	88	1	11	52	0,34	10	588,9664307
89	89	1	12	108	0,34	16	2117,553955
92	90	1	12	52	0,188	16	1074,953857
94	91	1	12	52	0,34	10	901,8596802
93	92	1	12	108	0,34	10	1432,906616
90	93	1	12	52	0,34	16	793,6296387
96	94	1	12	52	0,188	10	1646,463135
95	95	1	12	108	0,188	10	1525,140747
91	96	1	12	108	0,188	16	3027,833008
97	97	1	13	52	0,188	10	2245,935059
100	98	1	13	108	0,34	10	1148,015015
102	99	1	13	108	0,188	16	2279,354248
101	100	1	13	52	0,188	16	1021,821533
98	101	1	13	108	0,188	10	779,413208
104	102	1	13	108	0,34	16	890,2632446
103	103	1	13	52	0,34	16	901,9696655
99	104	1	13	52	0,34	10	1181,60083
105	105	1	14	108	0,34	16	1283,742798
108	106	1	14	52	0,188	16	1129,696899
110	107	1	14	52	0,34	10	1058,057617
109	108	1	14	108	0,34	10	1558,317993
106	109	1	14	52	0,34	16	806,3066406

112	110	1	14	52	0,188	10	1247,466064
111	111	1	14	108	0,188	10	1178,938354
107	112	1	14	108	0,188	16	2965,174561
113	113	1	15	52	0,188	10	1497,63855
116	114	1	15	108	0,34	10	2369,087402
118	115	1	15	108	0,188	16	913,2324829
117	116	1	15	52	0,188	16	949,8661499
114	117	1	15	108	0,188	10	1161,832031
120	118	1	15	108	0,34	16	1239,823608
119	119	1	15	52	0,34	16	848,9125366
115	120	1	15	52	0,34	10	1171,227783
121	121	1	16	108	0,34	16	854,6547241
124	122	1	16	52	0,188	16	969,3991089
126	123	1	16	52	0,34	10	1207,247437
125	124	1	16	108	0,34	10	1357,666626
122	125	1	16	52	0,34	16	774,7854614
128	126	1	16	52	0,188	10	1478,930664
127	127	1	16	108	0,188	10	1331,074219
123	128	1	16	108	0,188	16	670,2150879

C.3 1. Versuchsreihe 2. Durchlauf

Std-R- folge	Durchlauf- reihenfolge	Zentral- punkt	Blöcke	Vorwärme- temperatur	Harzmenge	Drehmoment	Auspresskraft
1	1	1	1	52	0,188	10	952,5580444
4	2	1	1	108	0,34	10	680,5426025
6	3	1	1	108	0,188	16	1131,795532
5	4	1	1	52	0,188	16	1065,009277
2	5	1	1	108	0,188	10	1452,769531
8	6	1	1	108	0,34	16	542,2863159
7	7	1	1	52	0,34	16	929,2494507
3	8	1	1	52	0,34	10	1569,23291
9	9	1	2	52	0,188	10	705,0974121
12	10	1	2	108	0,34	10	2491,815674
14	11	1	2	108	0,188	16	1181,681274
13	12	1	2	52	0,188	16	786,9124146
10	13	1	2	108	0,188	10	1144,747681
16	14	1	2	108	0,34	16	859,6611938
15	15	1	2	52	0,34	16	2698,937012
11	16	1	2	52	0,34	10	1161,787231
17	17	1	3	52	0,188	10	1245,154175
20	18	1	3	108	0,34	10	869,6488647
22	19	1	3	108	0,188	16	1314,323608
21	20	1	3	52	0,188	16	1199,021851
18	21	1	3	108	0,188	10	1560,127808
24	22	1	3	108	0,34	16	647,6557007
23	23	1	3	52	0,34	16	652,730957
19	24	1	3	52	0,34	10	919,6098022
25	25	1	4	52	0,188	10	1909,232788
28	26	1	4	108	0,34	10	756,7744141
30	27	1	4	108	0,188	16	1236,21106
29	28	1	4	52	0,188	16	2015,89978
26	29	1	4	108	0,188	10	1723,09314
32	30	1	4	108	0,34	16	861,8795166
31	31	1	4	52	0,34	16	1166,078125
27	32	1	4	52	0,34	10	1295,564575
33	33	1	5	52	0,188	10	1041,776978
36	34	1	5	108	0,34	10	565,5644531
38	35	1	5	108	0,188	16	1610,002075
37	36	1	5	52	0,188	16	993,8963013
34	37	1	5	108	0,188	10	1662,274902
40	38	1	5	108	0,34	16	1828,968994
39	39	1	5	52	0,34	16	1201,553467
35	40	1	5	52	0,34	10	1719,528076
41	41	1	6	52	0,188	10	1300,467651
44	42	1	6	108	0,34	10	601,9542847
46	43	1	6	108	0,188	16	1579,037476
45	44	1	6	52	0,188	16	1250,820435
42	45	1	6	108	0,188	10	1536,197021
48	46	1	6	108	0,34	16	866,0834961
47	47	1	6	52	0,34	16	1868,784302
43	48	1	6	52	0,34	10	1275,571655
49	49	1	7	52	0,188	10	1256,593384
52	50	1	7	108	0,34	10	1964,905762
54	51	1	7	108	0,188	16	1451,405273
53	52	1	7	52	0,188	16	1260,762939
50	53	1	7	108	0,188	10	910,3600464

56	54	1	7	108	0,34	16	1109,220337
55	55	1	7	52	0,34	16	915,8754883
51	56	1	7	52	0,34	10	1091,763428
57	57	1	8	52	0,188	10	1090,975586
60	58	1	8	108	0,34	10	674,8492432
62	59	1	8	108	0,188	16	1409,418823
61	60	1	8	52	0,188	16	1000,262268
58	61	1	8	108	0,188	10	1121,325562
64	62	1	8	108	0,34	16	1740,923828
63	63	1	8	52	0,34	16	979,9067383
59	64	1	8	52	0,34	10	1644,542114
65	65	1	9	52	0,188	10	643,5202026
68	66	1	9	108	0,34	10	914,2029419
70	67	1	9	108	0,188	16	1581,078979
69	68	1	9	52	0,188	16	1598,603516
66	69	1	9	108	0,188	10	1283,05188
72	70	1	9	108	0,34	16	3777,297119
71	71	1	9	52	0,34	16	1420,062744
67	72	1	9	52	0,34	10	1565,485962
73	73	1	10	52	0,188	10	570,0200195
76	74	1	10	108	0,34	10	573,9897461
78	75	1	10	108	0,188	16	1659,336304
77	76	1	10	52	0,188	16	1359,103027
74	77	1	10	108	0,188	10	1718,320068
80	78	1	10	108	0,34	16	682,1134033
79	79	1	10	52	0,34	16	602,7287598
75	80	1	10	52	0,34	10	1390,260986
81	81	1	11	52	0,188	10	1391,181396
84	82	1	11	108	0,34	10	2834,01001
86	83	1	11	108	0,188	16	1238,756104
85	84	1	11	52	0,188	16	963,8805542
82	85	1	11	108	0,188	10	1212,919434
88	86	1	11	108	0,34	16	2066,609131
87	87	1	11	52	0,34	16	430,0689697
83	88	1	11	52	0,34	10	3756,557617
89	89	1	12	52	0,188	10	973,28479
92	90	1	12	108	0,34	10	1828,06897
94	91	1	12	108	0,188	16	1618,525513
93	92	1	12	52	0,188	16	943,4844971
90	93	1	12	108	0,188	10	936,1747437
96	94	1	12	108	0,34	16	1193,240723
95	95	1	12	52	0,34	16	1035,536255
91	96	1	12	52	0,34	10	696,2051392
97	97	1	13	52	0,188	10	1187,134888
100	98	1	13	108	0,34	10	1329,299683
102	99	1	13	108	0,188	16	1196,827148
101	100	1	13	52	0,188	16	928,0408936
98	101	1	13	108	0,188	10	1327,983643
104	102	1	13	108	0,34	16	2290,627686
103	103	1	13	52	0,34	16	803,8125
99	104	1	13	52	0,34	10	1542,901611
105	105	1	14	52	0,188	10	1410,703613
108	106	1	14	108	0,34	10	1731,986816
110	107	1	14	108	0,188	16	1668,890625
109	108	1	14	52	0,188	16	1017,802856
106	109	1	14	108	0,188	10	1575,148193

112	110	1	14	108	0,34	16	1774,314087
111	111	1	14	52	0,34	16	1072,628662
107	112	1	14	52	0,34	10	440,6407776
113	113	1	15	52	0,188	10	752,920166
116	114	1	15	108	0,34	10	1429,442627
118	115	1	15	108	0,188	16	1614,280884
117	116	1	15	52	0,188	16	1928,837158
114	117	1	15	108	0,188	10	1317,279907
120	118	1	15	108	0,34	16	2133,967285
119	119	1	15	52	0,34	16	1583,075195
115	120	1	15	52	0,34	10	1009,133484
121	121	1	16	52	0,188	10	2275,080811
124	122	1	16	108	0,34	10	1619,89502
126	123	1	16	108	0,188	16	1445,114258
125	124	1	16	52	0,188	16	1958,080078
122	125	1	16	108	0,188	10	1238,048828
128	126	1	16	108	0,34	16	1494,93396
127	127	1	16	52	0,34	16	2421,153076
123	128	1	16	52	0,34	10	619,5151978

C.4 2. Versuchsreihe 1. Durchlauf

Std-R- folge	Durchlauf- reihenfolge	Zentral- punkt	Blöcke	Auspress- geschwindig- keit	Stempel	Spannmoment	Auspresskraft
1	1	1	1	2 groß		0	3614,60498
4	2	1	1	18 klein		0	1960,809937
6	3	1	1	18 groß		16	1934,971802
5	4	1	1	2 groß		16	1478,69873
2	5	1	1	18 groß		0	2555,412354
8	6	1	1	18 klein		16	3120,056641
7	7	1	1	2 klein		16	1552,159424
3	8	1	1	2 klein		0	1835,171387
9	9	1	2	2 groß		0	1300,108276
12	10	1	2	18 klein		0	2574,181641
14	11	1	2	18 groß		16	651,0183716
13	12	1	2	2 groß		16	419,9643555
10	13	1	2	18 groß		0	3757,186523
16	14	1	2	18 klein		16	1383,940308
15	15	1	2	2 klein		16	1527,288574
11	16	1	2	2 klein		0	826,0788574
17	17	1	3	2 groß		0	1252,692871
20	18	1	3	18 klein		0	1413,815552
22	19	1	3	18 groß		16	1927,109741
21	20	1	3	2 groß		16	1337,173828
18	21	1	3	18 groß		0	795,0952759
24	22	1	3	18 klein		16	1160,27478
23	23	1	3	2 klein		16	1410,48999
19	24	1	3	2 klein		0	1988,950317
25	25	1	4	2 groß		0	2003,564575
28	26	1	4	18 klein		0	1615,372314
30	27	1	4	18 groß		16	1261,078003
29	28	1	4	2 groß		16	1918,911621
26	29	1	4	18 groß		0	2575,302002
32	30	1	4	18 klein		16	1234,60376
31	31	1	4	2 klein		16	2318,172852
27	32	1	4	2 klein		0	2041,11084
33	33	1	5	2 groß		0	1596,494995
36	34	1	5	18 klein		0	1480,108643
38	35	1	5	18 groß		16	953,1748047
37	36	1	5	2 groß		16	736,1998901
34	37	1	5	18 groß		0	1308,764282
40	38	1	5	18 klein		16	691,2601318
39	39	1	5	2 klein		16	2831,376709
35	40	1	5	2 klein		0	2164,362305
41	41	1	6	2 groß		0	791,2457275
44	42	1	6	18 klein		0	1515,271362
46	43	1	6	18 groß		16	513,5925293
45	44	1	6	2 groß		16	954,3843384
42	45	1	6	18 groß		0	1483,406006
48	46	1	6	18 klein		16	1575,646484
47	47	1	6	2 klein		16	3130,640869
43	48	1	6	2 klein		0	1225,754395
49	49	1	7	2 groß		0	1136,799438
52	50	1	7	18 klein		0	2147,31543
54	51	1	7	18 groß		16	1148,672241
53	52	1	7	2 groß		16	480,973938
50	53	1	7	18 groß		0	753,8900146

56	54	1	7	18 klein	16	1861,627686
55	55	1	7	2 klein	16	1401,546265
51	56	1	7	2 klein	0	1587,408325
57	57	1	8	2 groß	0	737,2781982
60	58	1	8	18 klein	0	1588,4021
62	59	1	8	18 groß	16	2295,053955
61	60	1	8	2 groß	16	1775,956421
58	61	1	8	18 groß	0	495,8259888
64	62	1	8	18 klein	16	1280,525269
63	63	1	8	2 klein	16	432,0441284
59	64	1	8	2 klein	0	1334,129639
65	65	1	9	2 groß	0	1687,410522
68	66	1	9	18 klein	0	1798,208374
70	67	1	9	18 groß	16	1006,490295
69	68	1	9	2 groß	16	776,0452271
66	69	1	9	18 groß	0	859,9606323
72	70	1	9	18 klein	16	2014,054688
71	71	1	9	2 klein	16	1834,7677
67	72	1	9	2 klein	0	2841,049072
73	73	1	10	2 groß	0	1810,37439
76	74	1	10	18 klein	0	2972,359863
78	75	1	10	18 groß	16	2566,943115
77	76	1	10	2 groß	16	1604,722778
74	77	1	10	18 groß	0	629,4857178
80	78	1	10	18 klein	16	1663,281494
79	79	1	10	2 klein	16	636,3161621
75	80	1	10	2 klein	0	814,6358643
81	81	1	11	2 groß	0	1167,91333
84	82	1	11	18 klein	0	2709,930908
86	83	1	11	18 groß	16	1740,838623
85	84	1	11	2 groß	16	2974,905029
82	85	1	11	18 groß	0	1535,064331
88	86	1	11	18 klein	16	2616,890137
87	87	1	11	2 klein	16	1290,706665
83	88	1	11	2 klein	0	2467,34668
89	89	1	12	2 groß	0	842,3549805
92	90	1	12	18 klein	0	1104,346191
94	91	1	12	18 groß	16	3024,598389
93	92	1	12	2 groß	16	603,8652344
90	93	1	12	18 groß	0	2699,280762
96	94	1	12	18 klein	16	3502,550293
95	95	1	12	2 klein	16	2566,546143
91	96	1	12	2 klein	0	4042,123535
97	97	1	13	2 groß	0	2759,37207
100	98	1	13	18 klein	0	3424,807617
102	99	1	13	18 groß	16	1494,744629
101	100	1	13	2 groß	16	719,8060913
98	101	1	13	18 groß	0	680,314209
104	102	1	13	18 klein	16	2903,28418
103	103	1	13	2 klein	16	1987,839722
99	104	1	13	2 klein	0	2223,106445
105	105	1	14	2 groß	0	1442,04126
108	106	1	14	18 klein	0	2644,471924
110	107	1	14	18 groß	16	2218,044434
109	108	1	14	2 groß	16	705,2919922
106	109	1	14	18 groß	0	582,565979

112	110	1	14	18 klein	16	2768,330078
111	111	1	14	2 klein	16	1501,710815
107	112	1	14	2 klein	0	2155,067871
113	113	1	15	2 groß	0	2016,836182
116	114	1	15	18 klein	0	3867,686768
118	115	1	15	18 groß	16	1460,031128
117	116	1	15	2 groß	16	1221,886841
114	117	1	15	18 groß	0	2389,357178
120	118	1	15	18 klein	16	2162,034424
119	119	1	15	2 klein	16	1711,358765
115	120	1	15	2 klein	0	1761,803467
121	121	1	16	2 groß	0	1825,839111
124	122	1	16	18 klein	0	1992,249756
126	123	1	16	18 groß	16	2899,228271
125	124	1	16	2 groß	16	605,4884644
122	125	1	16	18 groß	0	1381,098267
128	126	1	16	18 klein	16	3705,451416
127	127	1	16	2 klein	16	1734,100952
123	128	1	16	2 klein	0	979,3340454

C.5 2. Versuchsreihe 2. Durchlauf

Std-R- folge	Durchlauf- reihenfolge	Zentral- punkt	Blöcke	Auspress- geschwindig- keit	Stempel	Spannmoment	Auspresskraft
1	1	1	1	2 groß		0	967,1110229
4	2	1	1	18 klein		0	627,4919434
6	3	1	1	18 groß		16	913,9931641
5	4	1	1	2 groß		16	2123,130859
2	5	1	1	18 groß		0	988,5991821
8	6	1	1	18 klein		16	3073,819824
7	7	1	1	2 klein		16	1648,423584
3	8	1	1	2 klein		0	2423,409424
9	9	1	2	2 groß		0	2275,386719
12	10	1	2	18 klein		0	1360,004517
14	11	1	2	18 groß		16	892,2733154
13	12	1	2	2 groß		16	1083,628296
10	13	1	2	18 groß		0	1122,962402
16	14	1	2	18 klein		16	1572,204346
15	15	1	2	2 klein		16	1414,772217
11	16	1	2	2 klein		0	2301,057861
17	17	1	3	2 groß		0	884,7953491
20	18	1	3	18 klein		0	1050,565552
22	19	1	3	18 groß		16	1385,826538
21	20	1	3	2 groß		16	1499,342285
18	21	1	3	18 groß		0	920,8703003
24	22	1	3	18 klein		16	2018,341309
23	23	1	3	2 klein		16	813,7891235
19	24	1	3	2 klein		0	1491,994629
25	25	1	4	2 groß		0	652,453125
28	26	1	4	18 klein		0	1685,261353
30	27	1	4	18 groß		16	1114,622681
29	28	1	4	2 groß		16	395,865448
26	29	1	4	18 groß		0	388,9587402
32	30	1	4	18 klein		16	1672,807861
31	31	1	4	2 klein		16	3678,564209
27	32	1	4	2 klein		0	1879,98999
33	33	1	5	2 groß		0	2654,307861
36	34	1	5	18 klein		0	1378,129272
38	35	1	5	18 groß		16	482,7195435
37	36	1	5	2 groß		16	1726,627808
34	37	1	5	18 groß		0	704,0505371
40	38	1	5	18 klein		16	1985,236694
39	39	1	5	2 klein		16	1938,171997
35	40	1	5	2 klein		0	1792,808838
41	41	1	6	2 groß		0	1209,588989
44	42	1	6	18 klein		0	2020,645386
46	43	1	6	18 groß		16	1712,319092
45	44	1	6	2 groß		16	1782,741699
42	45	1	6	18 groß		0	1500,687988
48	46	1	6	18 klein		16	1472,973877
47	47	1	6	2 klein		16	3358,608398
43	48	1	6	2 klein		0	1568,623535
49	49	1	7	2 groß		0	2756,18042
52	50	1	7	18 klein		0	1989,276001
54	51	1	7	18 groß		16	1170,320068
53	52	1	7	2 groß		16	1364,353027
50	53	1	7	18 groß		0	392,9775696

56	54	1	7	18 klein	16	1109,234375
55	55	1	7	2 klein	16	2837,477295
51	56	1	7	2 klein	0	1632,292358
57	57	1	8	2 groß	0	722,5027466
60	58	1	8	18 klein	0	2735,938965
62	59	1	8	18 groß	16	417,6643982
61	60	1	8	2 groß	16	788,2331543
58	61	1	8	18 groß	0	2235,215088
64	62	1	8	18 klein	16	1739,059204
63	63	1	8	2 klein	16	2886,967041
59	64	1	8	2 klein	0	3891,381836
65	65	1	9	2 groß	0	887,4693604
68	66	1	9	18 klein	0	1317,30188
70	67	1	9	18 groß	16	2285,406494
69	68	1	9	2 groß	16	1567,607056
66	69	1	9	18 groß	0	403,4547119
72	70	1	9	18 klein	16	2300,228516
71	71	1	9	2 klein	16	799,303894
67	72	1	9	2 klein	0	1622,356445
73	73	1	10	2 groß	0	1247,324219
76	74	1	10	18 klein	0	1801,301025
78	75	1	10	18 groß	16	625,4985962
77	76	1	10	2 groß	16	466,7393494
74	77	1	10	18 groß	0	1613,212524
80	78	1	10	18 klein	16	735,7382813
79	79	1	10	2 klein	16	532,4118652
75	80	1	10	2 klein	0	2549,450684
81	81	1	11	2 groß	0	2198,467041
84	82	1	11	18 klein	0	1649,772461
86	83	1	11	18 groß	16	1010,443542
85	84	1	11	2 groß	16	2107,249756
82	85	1	11	18 groß	0	1233,216553
88	86	1	11	18 klein	16	937,3184204
87	87	1	11	2 klein	16	2259,566162
83	88	1	11	2 klein	0	3151,757568
89	89	1	12	2 groß	0	2269,001953
92	90	1	12	18 klein	0	1012,502441
94	91	1	12	18 groß	16	347,2817078
93	92	1	12	2 groß	16	786,5474854
90	93	1	12	18 groß	0	983,3443604
96	94	1	12	18 klein	16	1781,762085
95	95	1	12	2 klein	16	2538,987549
91	96	1	12	2 klein	0	2059,827393
97	97	1	13	2 groß	0	2331,980957
100	98	1	13	18 klein	0	1363,525513
102	99	1	13	18 groß	16	437,4734192
101	100	1	13	2 groß	16	2242,344482
98	101	1	13	18 groß	0	994,2398682
104	102	1	13	18 klein	16	1875,311035
103	103	1	13	2 klein	16	1845,235107
99	104	1	13	2 klein	0	3827,051025
105	105	1	14	2 groß	0	1766,332642
108	106	1	14	18 klein	0	1600,238281
110	107	1	14	18 groß	16	458,3362732
109	108	1	14	2 groß	16	1606,008301
106	109	1	14	18 groß	0	1016,718689

112	110	1	14	18 klein	16	1774,082275
111	111	1	14	2 klein	16	3519,450195
107	112	1	14	2 klein	0	3040,528076
113	113	1	15	2 groß	0	791,2816772
116	114	1	15	18 klein	0	1069,629272
118	115	1	15	18 groß	16	1517,740723
117	116	1	15	2 groß	16	1030,391235
114	117	1	15	18 groß	0	960,2536621
120	118	1	15	18 klein	16	2441,95752
119	119	1	15	2 klein	16	2100,310547
115	120	1	15	2 klein	0	2170,564941
121	121	1	16	2 groß	0	948,5404663
124	122	1	16	18 klein	0	1604,778198
126	123	1	16	18 groß	16	980,491272
125	124	1	16	2 groß	16	1277,768188
122	125	1	16	18 groß	0	509,4640503
128	126	1	16	18 klein	16	2180,254883
127	127	1	16	2 klein	16	3358,230957
123	128	1	16	2 klein	0	2013,655151

Literaturverzeichnis

- [1] Robert Bosch GmbH
- [2] Merkblatt 401 „Elektroband und -blech“, Stahl-Informations-Zentrum, Düsseldorf, Ausgabe 2005
- [3] URL: „<http://anorganik.chemie.vias.org/neodym-eisen-bor-magnete.html>“ (Abgerufen: 17. August 2012, 09:17 UTC+1)
- [4] URL: „<http://www.magnete.de/uploads/media/hystereseschleife.de.pdf>“ (Abgerufen: 08. Oktober 2012, 10:38 UTC+1)
- [5] Cassing, W. (2007). Dauermagnete: Mess- und Magnetisieretechnik. Renningen: Expert Verlag.
- [6] Robert Bosch GmbH DFSS Green Belt Training V2.4
- [7] Robert Bosch GmbH DFSS Green Belt Training V2.4
- [8] Robert Bosch GmbH DFSS Green Belt Training V2.4
- [9] Gebhardt, Gerhard: Produkt- und Prozessoptimierung durch die Anwendung der statistischen Versuchsplanung (DoE, Design of Experiments). Mittweida, University of Applied Sciences, Fakultät Maschinenbau, Modul Qualitätsmanagement, Vorlesungsskript, 2012
- [10] URL: „<http://www.autos-hybrid.de/hybridantrieb.html>“ (Abgerufen: 13. November 2012, 09:49 UTC+1)
- [11] Braess/Seiffert. Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Vieweg Verlag.
- [12] Krämer, Hans-Joachim: Klebeverbindungen. Mittweida, University of Applied Sciences, Fakultät Maschinenbau, Modul Maschinenelemente I, Vorlesungsskript, 2010

- [13] URL: „http://www.technomag.ch/fileadmin/media/pdf/exxonmobil/Mobiltrans_HD_30_de.pdf“ (Abgerufen: 17. November 2012, 10:57 UTC+1)
- [14] Tabellenbuch Metall, Verlag: Europa Lehrmittel, 45. neu bearbeitete und erweiterte Auflage
- [15] URL:
„<http://www.synflex.com/de/produkte/?id=2&areaid=impraegnierstoffe>“ (Abgerufen: 19. November 2012, 14:21 UTC+1)
- [16] Minitab 16 Statistikglossar
- [17] Minitab 16 StatGuide
- [18] Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung. Vieweg+Teubner Verlag

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, 10.12.2012